

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО

• • • • • **НЕДЕЛЯ**
• • • • • **НАУКИ СПБПУ**
• • • • **П** 18–23 ноября 2019 года

МАТЕРИАЛЫ
научной конференции
с международным участием

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ



ПОЛИТЕХ-ПРЕСС
Санкт-Петербургский
политехнический университет
Петра Великого

Санкт-Петербург
2020

УДК 621
ББК 31
Н42

Неделя науки СПбПУ : материалы научной конференции с международным участием, 18–23 ноября 2019 г. **Институт энергетики.** – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. – 308 с.

В сборник включены статьи студентов, аспирантов, молодых ученых и сотрудников СПбПУ, университетов, научных организаций и предприятий Санкт-Петербурга, России, зарубежных стран по материалам докладов, принятых на секционные заседания конференции «Неделя науки СПбПУ» Института энергетики. Статьи отражают современный уровень научно-исследовательской работы участников конференции в области электротехники, электроэнергетики, атомной и тепловой энергетики, а также энергетического машиностроения.

Представляют интерес для специалистов в различных областях знаний, для учащихся и работников системы высшего образования и Российской академии наук.

Редакционная коллегия
Института энергетики СПбПУ:

С. Г. Зверев (директор института), *А. В. Митяков* (зам. директора по НИР),
А. П. Плотников (отв. ред.), *Д. В. Иванов*, *Г. А. Першиков*,
С. В. Скулкин, *Ю. В. Матвеев*

Печатается по решению
Совета по издательской деятельности Ученого совета
Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

ISBN 978-5-7422-6944-1

© Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого, 2020

**РАЗРАБОТКА ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ОТ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Актуальность. В современном мире становится всё труднее и труднее представить жизнь человека без всякого рода электроники: смартфоны, часы, наушники и так далее. С появлением всё более разнообразных устройств и, в конечном счете, увеличением количества гаджетов, остро встает вопрос об их заряде. Появление портативных зарядных устройств несколько облегчило ситуацию, однако им самим необходим источник для питания, чего невозможно добиться в автономных условиях. Справиться с этой проблемой поможет подзарядка от ЛЭП с помощью наведенного напряжения.

Введение. Наведенным напряжением называется разность потенциалов между проводящими частями электроустановок и точкой нулевого потенциала, возникающая в результате воздействия электрического и магнитного полей, создаваемых расположенными вблизи электроустановками, находящимися под напряжением [1]. В нашей модели мы используем только магнитную составляющую, так как она вносит основной вклад и расчет электрической составляющей является затруднительным вследствие влияния многих факторов.

Цель работы

Произвести расчет модели в программе Mathcad.

Исходя из расчета в программе Mathcad, рассчитать параметры катушки, для получения нужных значений напряжения.

Разработать рабочую модель и провести замеры наведенного напряжения.

Сравнить результаты модели с результатами замеров и уточнить расчетную модель.

Создание указаний по выбору параметров катушки для ВЛ различного номинального напряжения.

Методы исследования. Моделирование, эксперимент.

Исследуемая модель (см. рис. 1) представляет собой плоскую катушку больших размеров. На её выводы присоединяется диодный мост, с помощью которого выпрямляется напряжение. Также присутствует конденсатор в качестве фильтра и DC-DC преобразователь для стабилизации напряжения.

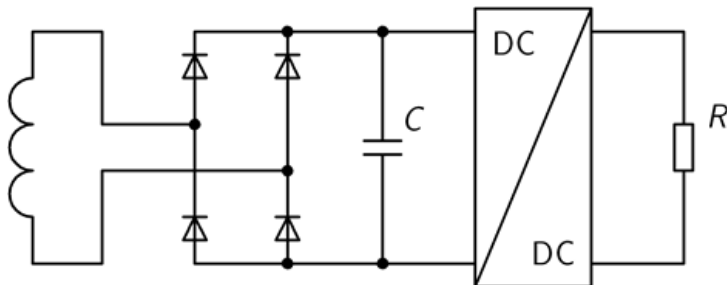


Рис. 1. Схема исследуемой модели

Расчет модели в Mathcad.

X- и Y- компоненты вектора магнитной индукции B [2]:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{y' - y_1}{(x - x_1)^2 + (y' - y_1)^2}, \quad (1)$$

$$B_y = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \cdot \frac{x_1 - x}{(x - x_1)^2 + (y' - y_1)^2}, \quad (2)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, I – ток в проводе, (x_1, y_1) координаты центра провода.

Расчет угла между нормалью к плоскости контура и вектором магнитной индукции:

$$\cos(\alpha) = \frac{x_3 - x_2}{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_2 - y_3)^2}}, \quad (3)$$

$$\sin(\alpha) = \frac{y_2 - y_3}{\sqrt{(x_3 - x_2)^2 + (y_2 - y_3)^2}}, \quad (4)$$

где α – угол между нормалью к контуру и осью y , (x_2, y_2) , (x_3, y_3) – координаты горизонтальных проводников измерительного контура.

Нормальная составляющая вектора магнитной индукции:

$$B_n = B_y \cos(\alpha) + B_x \sin(\alpha). \quad (5)$$

Поток магнитного поля:

$$\Phi = L_z \int_{x_2}^{x_3} B_n \sqrt{1 + \left(\frac{y_2 - y_3}{x_3 - x_2}\right)^2} dx, \quad (6)$$

где L_z – длина измерительного контура в направлении оси z .

Токи в фазах:

$$I_A = 1000 \text{ A}, I_B = 1000 \text{ A}, I_C = 1000 \text{ A}.$$

Сдвиг фаз

$$\varphi_A = 0, \varphi_B = \frac{2\pi}{3}, \varphi_C = \frac{4\pi}{3}.$$

Поток

$$\Phi_{ABC} = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C. \quad (7)$$

ЭДС

$$E = \frac{d\Phi_{ABC}}{dt}. \quad (8)$$

Расчет сопротивления и массы провода

Требуемые параметры:

6,5 В, 1 А, $\eta=0,5$, где η – КПД устройства.

Требуемая ЭДС:

$$E_T = \frac{6,5}{\eta} = 13 \text{ В}.$$

Требуемое сопротивление:

$$R_T = \frac{E_T \cdot (1 - \eta)}{1} = 6,5 \text{ Ом}$$

Число витков: $n = 18$.

Периметр витка:

$$P = 2 \cdot (L_z + \sqrt{(X_2 - X_3)^2 + (Y_2 - Y_3)^2}) = 160,3 \text{ м}$$

Удельное сопротивление меди [3]: $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8} \text{ Ом/м}$.

Сечение провода:

$$S = \frac{\rho P n}{\Delta T} = 7,335 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Масса:

$$m = s P n \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 177,856 \text{ кг}.$$

Для проверки достоверности предлагаемого расчета мы провели опыт, измерив напряжение, наводящееся в 10 витках, имеющих контур длиной 4,25 метра под ЛЭП 220 кВ. В результате измерения мультиметром было получено значение напряжения 16,32 мВ. Далее, для проведенного эксперимента мы составили расчетную модель. По итогам расчета было получено значение напряжения 15 мВ. Сопоставляя полученные значения наведенного напряжения, можно сказать, что незначительные отклонения в полученных результатах связаны с наличием электромагнитных полей сторонних объектов и погрешностью измерительного прибора (мультиметра). Таким образом, результаты проведенного эксперимента свидетельствуют о правильности используемой модели.

Для 220 кВ: нам понадобится создать контур периметром 200 м с 17 витками и общей массой 165 кг меди или 76 кг алюминия на высоте 5 метров.

Для 500 кВ: нам понадобится создать контур периметром 100 м с 17 витками и общей массой 30 кг меди или 14 кг алюминия на высоте 5 метров.

Для 750 кВ: нам понадобится создать контур периметром 65 м с 15 витками и общей массой 14 кг меди или 6,5 кг алюминия на высоте 3 метра.

Вывод. Согласно результатам исследования данный метод резервирования может быть принят к использованию для заряда электронных устройств. Однако большой вес и большие геометрические размеры делают его экстренным средством для осуществления электропитания зарядного устройства и значительно ограничивают диапазон его потенциального применения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. / под общей редакцией чл.-корр. РАН А. Ф. Дьякова. - Москва: "Энергопрогресс" Корпорации "ЕЭЭК", 2012. – 696 с.
2. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. Теоретические основы электротехники, Том 3 – Санкт-Петербург: Издательство «Питер», 2006. – 376 с.
3. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ В. В. Ершевич, А.Н. Зейлигер, Г. А. Илларионов и др.; Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.

УДК 537.218

К.В. Волошин, В.В. Титков, Ю.Н. Бочаров
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДОВ С ЗАКРУГЛЕННЫМИ КРОМКАМИ

Электрическая прочность изоляционных конструкций в сильной степени зависит от конфигурации электрических полей в изоляционных промежутках. Специальные меры позволяют снизить неоднородность электрического поля, уменьшить изоляционные расстояния во внешней и внутренней изоляции. Известно, что электрические поля около краев электродов являются неоднородными. Полное устранение краевого эффекта обещает применение конструкций электродов с закругленными кромками. В работе рассмотрены

электроды Фелиси [1], [2], Роговского [3], и Новгородцева [4], а также предпринята попытка совершенствования данных профилей.

С помощью программы COMSOL Multyphysics осуществлялось исследование электрического поля вблизи кромки электрода. Потенциал электрода 3,6 кВ, потенциал плоскости 1,8 кВ, расстояние электрод-плоскость 10 мкм, средняя напряженность $E_0 = 180$ кВ/мм. Результаты представлены на рис.1 – 4: E_c – напряженность электрического поля вдоль кромки электрода, E_m – средняя напряженность электрического поля. Толщина электрода h , расстояние электрод-плоскость d . Максимальная напряженность поля E_{\max} .

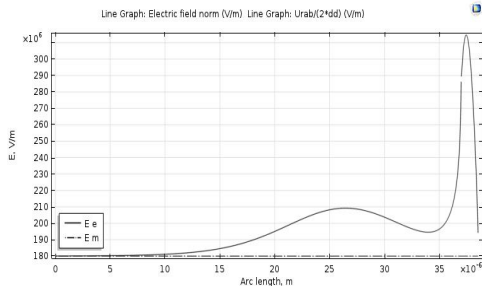


Рис. 1. Напряженность электрического поля вдоль поверхности электрода Фелиси [1]. $h/d=1$. $E_{\max}=314,696$ кВ/мм. Уравнения профиля: $y(\theta) = \frac{d}{\pi} \left(\cos \theta + 2 \ln \sin \frac{\theta}{2} \right)$; $x(\theta) = \frac{d}{\pi} (\theta + \sin \theta)$; $\theta \in (0; \pi)$

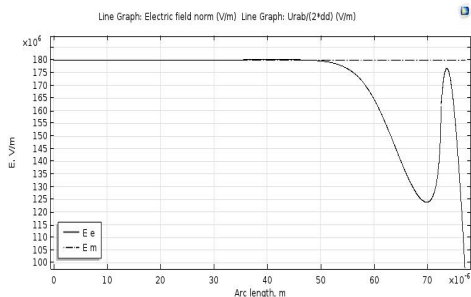


Рис. 2. Напряженность электрического поля вдоль поверхности электрода Роговского [3]. $h/d=1.5658$. $E_{\max}=180,134$ кВ/мм. Уравнения профиля: $y(\theta) = \frac{2d}{\pi} \left(e^{\theta} + \frac{\pi}{2} \right)$; $x(\theta) = \frac{2d}{\pi} \theta$; $\theta \in (-10; 0.9)$

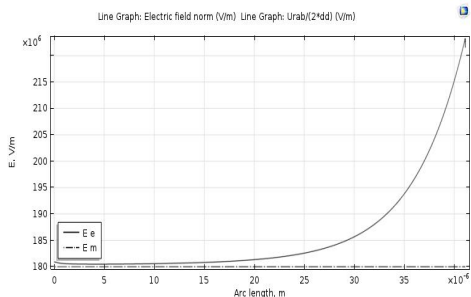


Рис. 3. Напряженность электрического поля вдоль поверхности электрода Фелиси [2]. $h/d=1$. $E_{\max}=223,258$ кВ/мм. Уравнения профиля: $y(\theta) = \frac{d}{\pi} \left(-\cos \theta + 2 \ln \sin \frac{\theta}{2} \right)$; $x(\theta) = \frac{d}{\pi} (-\theta + \sin \theta)$; $\theta \in (0; \pi)$

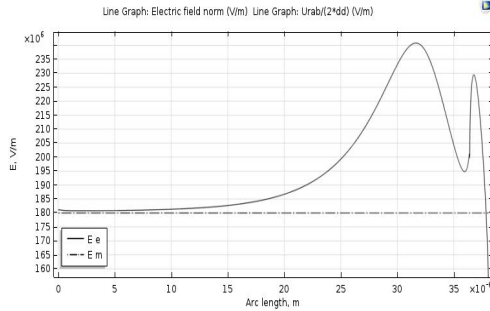


Рис. 4. Напряженность электрического поля вдоль поверхности электрода Новгородцева [4]. $h/d=1$. $E_{\max}=240,824$ кВ/мм. Уравнения профиля:

$$y(\theta) = \frac{2d}{\pi} \left(\arcsin(-\theta) + \sqrt{-\theta(1+\theta)} \right); \quad x(\theta) = \frac{d}{\pi} (\ln(-\theta) + 2(\theta + 1)); \quad \theta \in (0; \pi)$$

Из построенных четырех профилей, только профиль Роговского обеспечивает практически полное устранение краевого эффекта, однако толщина электрода превышает расстояние электрод-плоскость более, чем в 1.5 раза.

Предпринята попытка совершенствования представленных профилей, путем сопряжения с циклоидой переменного радиуса. Параметрические уравнения циклоиды:

$$y(t) = r(t)t - r(t) \sin(t); \quad x(t) = r(t) - r(t) \cos(t),$$

где r – радиус производящей окружности циклоиды:

$$r(t) = 0.5 * d + koef_s * t$$

Изменяя место сопряжения кривых (изменяя верхнюю границу интервала параметра s) и параметр циклоиды $koef_s$, были получены разные конфигурации электродов (таблица 1). Поиск оптимальных параметров сопряжения кривых осуществлялся с помощью Optimization Module COMSOL Multiphysics.

Таблица 1. Параметры электродов

Электрод	Параметр	Примерная толщина электрода				
		1,0d	1,1d	1,2d	1,3d	1,4d
Фелиси [1]	E, В/м	2.21E+08	2.09E+08	2.09E+08	2.08E+08	2.08E+08
	hh, м	1.04E-05	1.14E-05	1.21E-05	1.31E-05	1.44E-05
	s	-1.474	-0.712	-0.264	-0.248	-0.273
	koef_s	-0.781	-0.765	-0.779	-0.696	-0.598
Роговский [3]	E, В/м	2.21E+08	2.12E+08	2.01E+08	1.87E+08	1.84E+08
	hh, м	1.05E-05	1.14E-05	1.22E-05	1.34E-05	1.37E-05
	s	-1.0067	-0.6549	-0.6436	-0.2815	-0.2326
	koef_s	-0.8120	-0.7975	-0.7558	-0.7339	-0.7235
Фелиси [2]	E, В/м	2.34E+08	2.08E+08	1.98E+08	1.95E+08	1.93E+08
	hh, м	1.05E-05	1.15E-05	1.23E-05	1.32E-05	1.43E-05
	s	1.8469	1.9036	2.2860	2.2617	2.2954
	koef_s	-0.8531	-0.7680	-0.7501	-0.6961	-0.6416
Новгородцев [4]	E, В/м	2.35E+08	2.32E+08	2.29E+08	2.28E+08	2.26E+08
	hh, м	1.04E-05	1.15E-05	1.25E-05	1.33E-05	1.44E-05
	s	-0.3150	-0.3107	-0.3117	-0.3156	-0.3147
	koef_s	-0.7287	-0.6589	-0.6019	-0.5531	-0.5014

Для визуализации таблицы 1 представлен рис. 5.

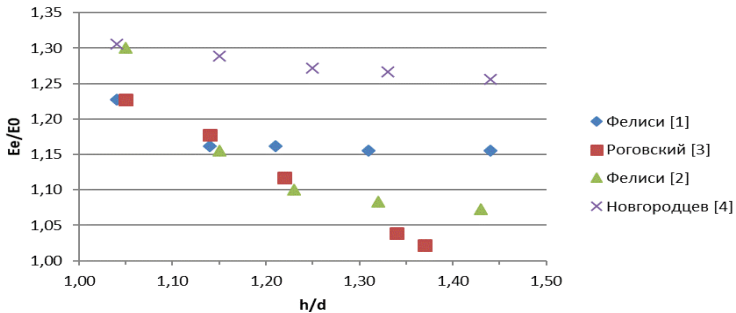


Рис. 5. Сравнение оптимизированных электродов

Наименьший коэффициент неоднородности электрического поля был достигнут при сопряжении циклоиды и электрода Роговского. Возможно, при использовании другой зависимости радиуса производящей окружности циклоиды от параметра t , а также при анализе зависимости кривизны от параметра t удастся достичь меньших значений максимальной напряженности электрического поля при меньшей величине h/d .

Устранение краевого эффекта позволяет получить при фиксированных габаритных размерах максимальную энергию электрического поля [4], а в некоторых системах, благодаря этому, может быть решена задача оптимизации конструкции по электрической прочности [2].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Noel J. Felici. Machines électrostatiques puissantes. J. Phys. Radium, 1948, 9 (2), pp.66-80.
2. Кучинский Г.С., Кизеветтер В.Е., Пинталь Ю.С. Изоляция установок высокого напряжения. Учеб. Пособие для электроэнерг. спец. вузов. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1987
3. Rogowski, W. Die elektrische Festigkeit am Rande des Plattenkondensators. Archiv f. Elektrotechnik 1923.
4. Шнейерсон Г.А. Поля и переходные процессы в аппаратуре сверхсильных токов. М.: ЭНЕРГОАТОМИЗДАТ 1992

УДК 621.315

А.М. Гулов, А.В. Колычев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ОПН-110 кВ С ВНЕШНИМ ИСКРОВОМ ПРОМЕЖУТКОМ

В течении последних лет в качестве повышения грозоупорности воздушных линий 110 кВ и выше все больше стали применяться защитные аппараты, принцип действия которых основан на нелинейном сопротивлении. В районах с высоким удельным сопротивлением грунтов, где растет вероятность обратного перекрытия, решением по повышению эффективности защиты ВЛ от молниевых перенапряжений может стать применение нелинейных ограничителей перенапряжений (ОПН) с внешним искровым промежутком, который получил название – линейный разрядник (ЛР).

Конструктивно ЛР представляет собой рабочий резистор (РР) с нелинейной вольт-амперной характеристикой и внешний искровой промежуток, соединенные последовательно. Модуль РР монтируется (подвешивается) на консоли к траверсе опоры над проводом с

некоторым смещением от гирлянды изоляторов (рис. 1, а), внешний искровой промежуток образуется между защитным экраном на модуле РР и проводом [1].

На двухцепных ВЛ 110 кВ с тросовой защитой наиболее широкое применение нашла схема установки ЛР-110 кВ на одной из цепей (рис.1, б). Такое применение защитных аппаратов (ЗА) позволяет практически полностью исключить двухцепные отключения и в несколько раз снизить одноцепные отключения при грозовых перенапряжениях незащищенной цепи [1].

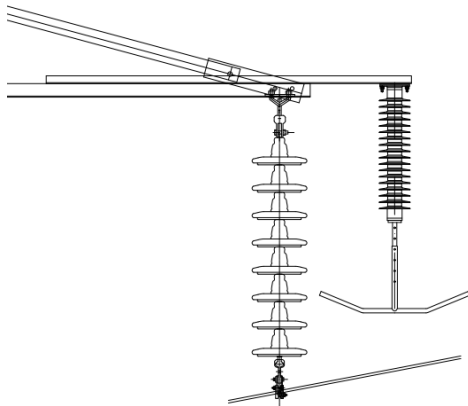


Рис. 1 а. Схема монтажа ЛР-110 кВ на траверсе опоры

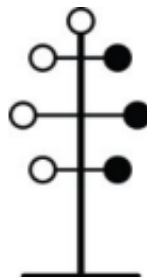


Рис.1 б. Схема расстановки ЛР-110 кВ на двухцепной ВЛ 110 кВ

○ – ЗА отсутствует; ● – ЗА установлен.

Одним из основных параметров ЛР является пропускная способность (удельная энергия) его рабочего резистора. Амплитуда разрядного тока и энергия, рассеиваемая ЛР при возникновении грозовых перенапряжений, зависят от многих факторов. Среди них параметры импульса тока и заряда вспышки молнии, конструктивные параметры ВЛ, место удара молнии в пролете и сопротивление заземления опор, характеристики ЛР. С точки зрения энергии, поглощаемой ЛР, определяющим параметром является суммарный заряд вспышки молнии, переносимый импульсами тока первого и последующих ударов. Так как рассматривается применение ЛР для защиты изоляции от обратных перекрытий, то основное внимание должно уделяться токовым и энергетическим воздействиям на ЛР при ударах молнии в трос (опору) [2].

Задачей работы является создание компьютерной модели для исследования характеристик ЛР и оценка полученных результатов. Моделирование и расчеты проводятся в программном комплексе ЕМТР.

Первая расчетная модель (модель 1) представляет собой приближение к лабораторным условиям испытаний разрядников. Как правило такие испытания проводятся на полномасштабных макетах изолирующих подвесок фазного провода, смонтированных на траверсе опоры ВЛ, то есть расчеты ведутся для одного защитного аппарата.

Вторая расчетная модель (модель 2) приближена к реальным эксплуатационным условиям и представляет собой участок двухцепной линии с тросом, состоящий из четырех промежуточных опор П110-4В. На каждой опоре одна цепь полностью защищена ЛР. Таким образом при расчетах пропускной способности аппарата учитывается влияние соседних пролетов ЛЭП и перекрытия на незащищенной цепи.

Результаты, полученные для первой модели представлены на рисунке 2, где показана зависимость приведенной энергии, поглощаемой ЛР, от величины заряда молнии. Все расчеты проводились при сопротивлении заземления опоры 100 Ом.

Приведенная энергия (W^*) численно равна удельной энергии, поглощаемой ЛР, на единицу заряда (Q_m). Она определяется путем пересчета полной энергии (W_Σ), как:

$$W^* = \frac{W_\Sigma}{U_{НР} \cdot Q_m},$$

где $U_{НР}$ – наибольшее рабочее напряжение рабочего резистора разрядника.

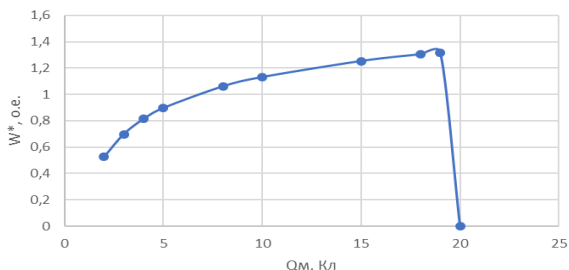


Рис. 2. Зависимость энергии, поглощаемой ЛР-110 кВ, от заряда вспышки молнии ($\tau_{ф}/\tau_{н} = 2/140$ мкс)

Как видно из рисунка 2, при амплитуде тока молнии 100 кА (заряд $Q_m \sim 20$ Кл) происходит перекрытие изоляционной подвески, и энергия в ЛР не выделяется.

При рассмотрении приближенной к эксплуатационным условиям модели (модели 2) зависимость энергии от заряда не получилась возрастающей, что связано с взаимовлиянием ЛР на соседних фазах и опорах. Величины энергий при малых зарядах молнии соизмеримы в обеих расчетных моделях, но уже при заряде молнии ~ 5 Кл происходит перекрытие на фазе незащищенной цепи и энергия, рассеиваемая в разрядниках, резко падает и при дальнейшем увеличении заряда молнии растет не так значительно, как в случае расчетов для одного ЛР. Результаты расчетов по обоим моделям сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Приведенная энергия, поглощаемая ЛР

I _м , амплитуда тока молнии, кА	Q _м , суммарный заряд, Кл	W*, о. е.			
		Модель 1	Модель 2		
			Верхняя фаза	Средняя фаза	Нижняя фаза
10	2	0,525	–	–	–
15	3	0,699	0	0,074	0,086
20	4	0,813	0,075	0,084	0,105
25	5	0,896	0,057	0,063	0,057
40	8	1,060	0,043	0,043	0,049
50	10	1,131	0,033	0,043	0,051
75	15	1,252	0,065	0,057	0,048
90	18	1,304	0,046	0,045	0,053
95	19	1,319	0,048	0,043	0,055
100	20	0	0,049	0,041	0,049
150	30	–	0,046	0,057	0,062
200	40	–	0	0	0,069

Используя известные статистические распределения можно получить зависимость вероятности заряда молнии от суммарной удельной энергии (рис. 3) [3].

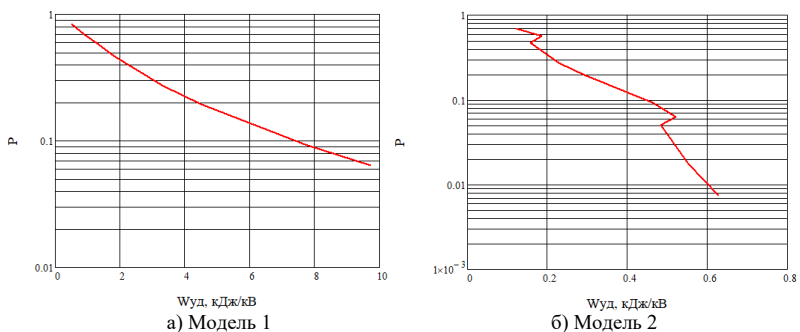


Рис. 3 Зависимость вероятности заряда молнии от суммарной удельной энергии

Таким образом, при расчете пропускной способности ЛР-110 кВ, применяемых для защиты одной из цепей, необходимо учитывать не только влияние соседних разрядников, но и перекрытие изоляции на незащищенной цепи. Расчеты с помощью разработанной компьютерной модели показывают, что взаимовлияние разрядников, установленных на соседних опорах одной цепи, значительно снижают энергию, выделяемую в каждом ЛР. Перекрытия на незащищенной цепи ограничивают рост энергии через защитные аппараты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гайворонский А.С. Линейные разрядники. Радикальное средство грозозащиты ВЛ. Новости электротехники, №2(38), 2006.
2. Гайворонский А.С., Заболотников А.П. Грозозащита ВЛ без тросов. Опыт проектирования с применением линейных ОПН. Новости электротехники, №5(77), 2012.
3. Гумерова Н.И., Колычев А.В., Халилов Ф.Х. Молниезащита электрических сетей среднего, высокого и сверхвысокого напряжения: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. -369 с.

УДК 620.9

А.А. Даутов, Д.И. Хафизов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА УСТРОЙСТВА АРПИМ НА КОМПЛЕКСЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ ПТК «RTDS»

Энергосистема России включает в себя 7 синхронно работающих ОЭС, связанных линиями электропередачи напряжением 220-500 кВ и выше. Параллельно с ЕЭС России работают энергосистемы Азербайджана, Белоруссии, Грузии, Казахстана, Латвии, Литвы, Монголии, Украины и Эстонии. Помимо того, объекты генерации и потребления неравномерно распределены по 8 часовым зонам, что сопровождается большими перетоками мощностей между энергетическими зонами. Данная особенность энергосистемы требует непрерывного контроля перетоков мощности для межсистемных сечений.

Таким устройством противоаварийной автоматики (ПА) является «устройства автоматики разгрузки при перегрузке по мощности» (АРПИМ). АРПИМ является

промежуточным звеном между устройством АПНУ и АЛАР. Данная автоматика должна не допустить появления асинхронного режима в случае перегрузки ВЛ (нескольких линий).

Устройство определяет перегрузку по заданной линии (сечению) и создает управляющее воздействие. Управляющим воздействием (УВ) могут быть: Отключение генератора (генераторов); Снижение генерации (воздействие на АРС); Отключение нагрузки; Отключение линии. По способу выявления перегрузки линии можно выделить две группы, а именно: по превышению активной мощности; по углу напряжения.

Устройство должно «предупредить» начало АР и выдать соответствующее воздействие. Срабатывание ПА должно происходить только при перегрузке линии, которая может привести к нарушению динамической устойчивости системы. Для определения такого режима контроль только активной мощности может быть недостаточен

Целью данной работы является разработка алгоритма АРПМ для однозначного определения аварийного режима и его испытания по стандарту [1].

Рассмотрим возможные переходные процессы в энергосистеме: 1) КЗ вблизи установки ПА (характеризуется резким набором мощности и глубокой просадкой напряжения); 2) удаленное КЗ (сопровождается понижением напряжения и мощности [2]); 3) оперативные переключения (выполняются по расчетным режимам, что не должно вызывать нарушений устойчивости (случаи ошибочного действия персонала или наложение аварийных режимов на оперативные переключения должны приводить к срабатыванию автоматики)); 4) асинхронный режим (в таком случае производные мощности и напряжения различны по знаку [3]).

Таким образом, контролируя значения P , U , dP , dU , автоматика может точно определить переход в асинхронный режим работы системы и выдать соответствующее воздействие.

В стандарте прописаны основные требования к устройствам АРПМ. Исходя из этого, можно сформулировать ключевые требования к алгоритму АРПМ:

- устройство должно селективно выявлять развивающийся процесс нарушения устойчивости;

- обеспечивать отстройку устройства от КЗ, синхронных качаний, набросов мощности при оперативных переключениях;

- иметь высокое быстродействие;

- устройство должно быть локальным для обеспечения надежности работы;

Описание алгоритма. Принцип действия основан на анализе производных напряжения и мощности в месте установки устройства для селективного определения перегрузки, а также на расчете второй производной по активной мощности для определения объема управляющего воздействия в режиме реального времени. В результате такого подхода для рассматриваемого устройства необходимо задать минимально допустимое значение контролируемого напряжения и величину постоянной времени энергосистемы.

Имеется 3 ступени с различными уставками. Также предусмотрен сигнал блокировки (от близких КЗ). Первая ступень (грубая) имеет два пусковых органа – по мощности и напряжению. Вторая ступень отличается от первой наличием пускового органа по скорости снижения напряжения (позволяет выставить уставку по мощности близкой к АДП). Третья ступень имеет ПО по скорости и «ускорению» повышения перетока активной мощности, что обеспечивает быстрое срабатывание устройства при резком наборе активной мощности по сечению.

Первая и вторая ступени имеют фиксированный уровень УВ, третья ступень является адаптивной (уровень УВ зависит от скорости набора мощности по сечению).

Уставки по мощности у 2 и 3 ступеней одинаковы; уставки по времени для трех ступеней:

$$t_{3ст} < t_{2ст} < t_{1ст}.$$

В случае линейного увеличения перетока мощности по ВЛ должна отработать первая ступень. При аварийных событиях, таких как: «потеря» генераторов, аварийное отключение нагрузки и т.д., УВ должно поступить от 2 ступени автоматики. Третья ступень рассчитана на резкое (мгновенное) увеличение мощности (например, потеря генерации из-за аварий на шинах станций или аварийного отключения нагрузки в «избыточной» части ОЭС).

Алгоритм функционирования ПА (Рис. 1), а также испытательная модель ЭС (согласно [1]) реализованы на установке реального времени ПТК «RTDS». Проводились испытания, связанные с испытанием логики срабатывания устройства.

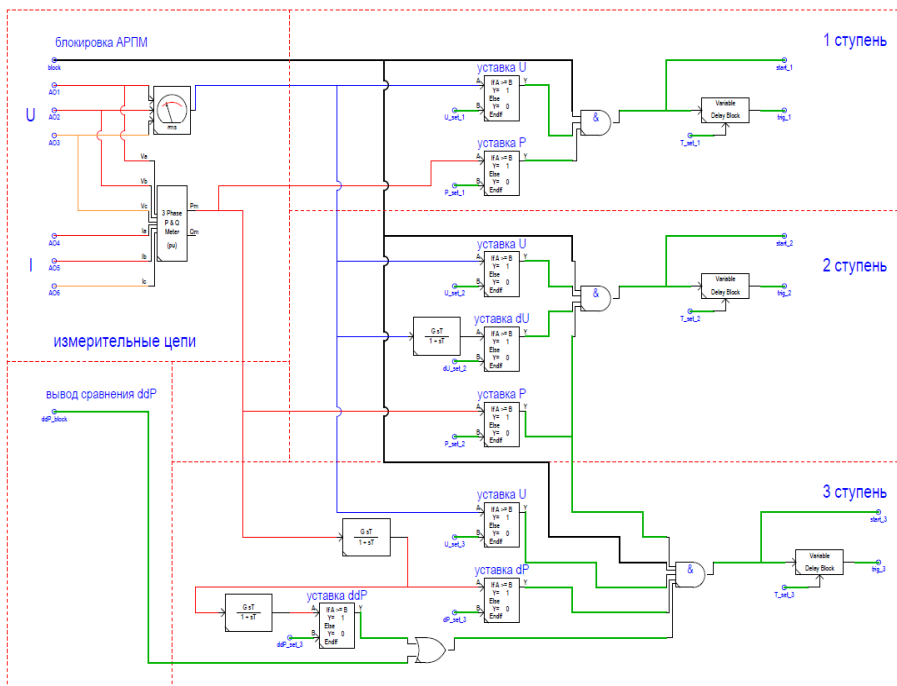


Рис. 1. Логическая схема АРПМ в ПТК «RTDS»

Ввиду отсутствия логики определения коротких замыканий, в опытах с таким видом возмущений был введен сигнал блокировки сравнения ddP (подразумевается сигнал блокировки от устройства РЗ).

Осциллограмма одного из экспериментов (характерное срабатывание устройства), представлена на Рис. 2. В этом опыте отработала вторая ступень с заданной выдержкой времени $t = 0.5$ с (сигнал не показан на рисунке).

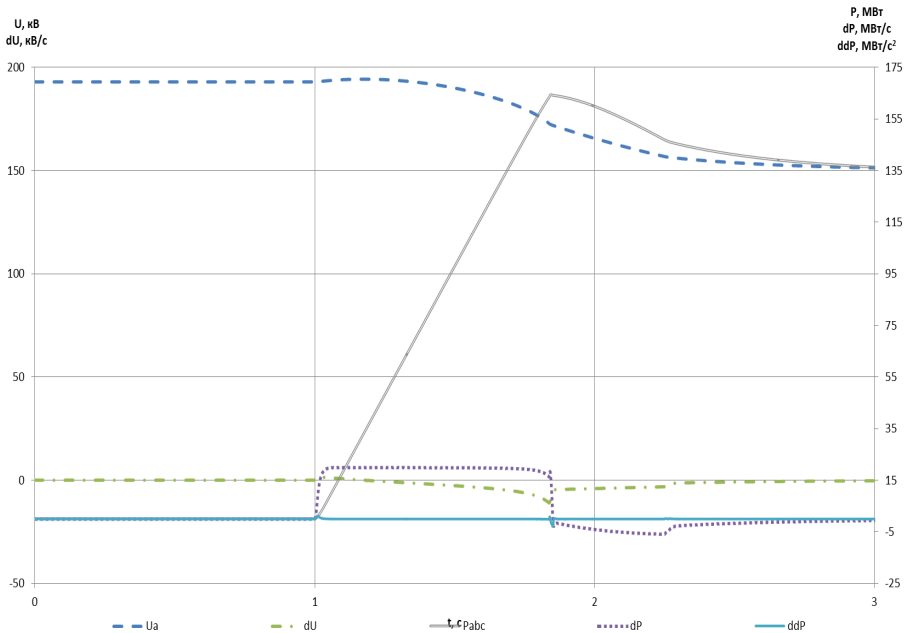


Рис. 2. Оциллограмма испытания в ПТК «RTDS»

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие *выводы*:

1. Отсутствие методики расчета уставок для dU , dP и ddP , требует более детального изучения переходных процессов (ПП), связанных с нарушением устойчивости.
2. Отсутствие встроенной логики блокировки от близких КЗ требует дополнительной выдержки по времени для надежной работы устройства.
3. Введение быстродействующей ступени (3) имеет смысл, при аварийном отключении нагрузки в избыточной части ОЭС.
4. Испытательная модель согласно [1] имеет некоторые ограничения по моделированию ПП, а также не учитывает обратное воздействие от устройства ПА. В связи с этим требуются дополнительные испытания алгоритма в условиях, приближенных к реальным.

ЛИТЕРАТУРА:

1. СТО СО ЕЭС 59012820.29.020.002-2017 «Релейная защита и автоматика. Автоматическое противоаварийное управление режимами энергосистем. Устройства автоматики разгрузки при перегрузке по мощности. Нормы и требования»// АО «СО ЕЭС», 2017 г.
2. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах Учебник для электротехнических и энергетических ВУЗов и факультетов. М., "Энергия", 1970 г.
3. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах Учеб. для электроэнергет. спец. Вузов. — 4-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1985 г.

РАСЧЁТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ
ПРОВОДНИКОВ С ТВЕРДОЙ ИЗОЛЯЦИЕЙ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ

В настоящее время слюдосодержащая терморезистивная изоляция широко используется как для изоляции обмоток высоковольтных электрических машин, так и для изоляции токопроводов. Такая изоляция имеет высокие эксплуатационные характеристики при длительном воздействии комплекса нагрузок. Но ее сочетание с токоведущей частью (ТВЧ) приводит к образованию в процессе изготовления опасных дефектов в виде отслоения изоляции от проводника.

Одним из важнейших этапов технологического процесса является термпрессование, которое включает в себя следующие шаги: нагрев до температуры 110°C и выдержка при этой температуре для обеспечения подвижности связующего, прессование высоким давлением, повышение температуры до 160°C и отверждение терморезистивного связующего при 160°C. Во время охлаждения системы при данном процессе неизбежно возникают технологические напряжения за счет разницы температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов проводника и изоляции и разности температур. Упрощённо можно дать оценку величине данных напряжений можно по формуле 1

$$\sigma_T = E_{и} \cdot (\alpha_{мет} - \alpha_{из}) \cdot (T_{п(с)} - T) \quad (1)$$

где $E_{и}$ – модуль упругости изоляции, $\alpha_{мет}$, $\alpha_{из}$ – ТКЛР проводника и изоляции, $T_{п(с)}$ – температура, при которой ведется процесс отверждения (или температура стеклования).

Более сложный расчет приведен в работах [1, 2]. Если уровень этих напряжений превышает адгезионную прочность, проявляются отслоения изоляции от токоведущей части [1 – 3]. Поэтому для определения стойкости системы изоляции к образованию отслоений и расслоений изоляции необходимо знать как уровень технологических напряжений, так и значение адгезионной прочности. Данная работа охватывает только одну сторону данной проблемы - создание модели для расчёта технологических напряжений в поперечном сечении проводника с твердой изоляцией при охлаждении от 160 °С до 20 °С в программе COMSOL Multiphysics 3.4 [4].

В первую очередь заданы геометрические параметры модели следующим образом: сечение токоведущей части 7,6 x 87,8 мм², толщина изоляции 4 мм. В отличие от реального проводника, первоначальная модель не имеет закруглений на ребрах. На рисунке 1 представлена готовая геометрическая 2D модель, построенная в программе Comsol. Для расчета был выбран модуль Structural Mechanics> Thermal Stress. Для получения результата Comsol решает систему уравнений (2)

$$\begin{aligned} s &= S_0 + C: (\varepsilon - \varepsilon_0 - \varepsilon_{th}), \\ \varepsilon_{th} &= \alpha(T - T_{ref}), \\ C &= C(E, \nu), \end{aligned} \quad (2)$$

где S – искомое напряжение, S_0 – исходное напряжение, ε – деформация, ε_0 – начальная деформация, ε_0 – термическая деформация, C – тензор, ν – коэффициент Пуассона, E – модуль Юнга.

Также, было выбрано граничное условие Rigid Motion Suppression. Это граничное условие позволяет получить однозначное решение задачи даже, когда у нас нет явных ограничений на перемещение модели, то есть эти ограничения вводятся автоматически, так чтобы система была однозначно разрешима.

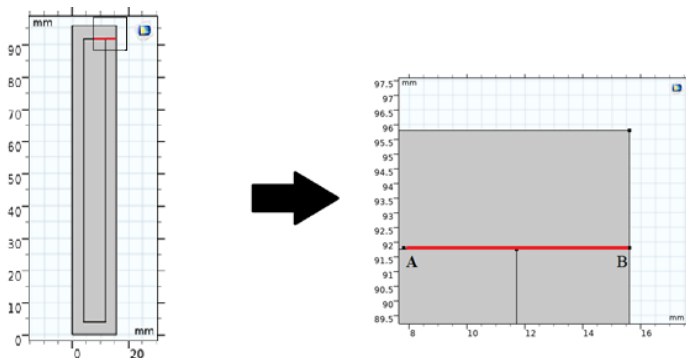


Рис. 1. Геометрическая 2D-модель, построенная в программе COMSOL

Рассмотрено два материала ТВЧ - медь и алюминий. Используемые значения характеристик элементов системы приведены в таблице 1.

Результаты расчета в Comsol Multiphysics для конструкции с проводником из меди (рисунок 2) показывают скачкообразное изменение напряжений в зоне ребра по отрезку АВ (координаты: А (x:7,8; y:91,8) и В (x:7,8; y:95,8)). Максимальное тангенциальное напряжение равно 17 МПа, что совпадает с диапазоном значений, полученных при расчете в [2].

Таблица 1. Данные для расчёта

	Е, ГПа	α , $1/K \cdot 10^{-6}$
Медь	110	16,3
Алюминий	70	22,2
Слюдосодержащая изоляция	27	8

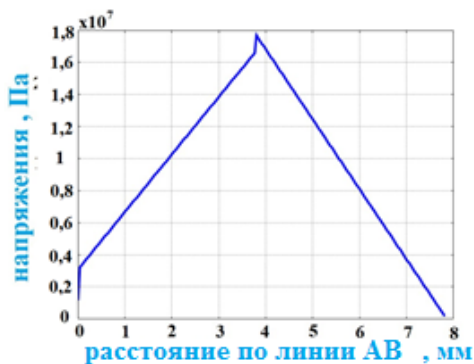


Рис. 2. Распределение напряжений по линии АВ

Аналогичный расчет для ТВЧ из алюминия показал повышение максимального значения тангенциального напряжения до 25 МПа по причине повышенного значения ТКЛР.

Приближение модели к реальной конструкции с помощью закругления ребер (радиус закругления 1 мм) показало другие результаты (рисунок 3).

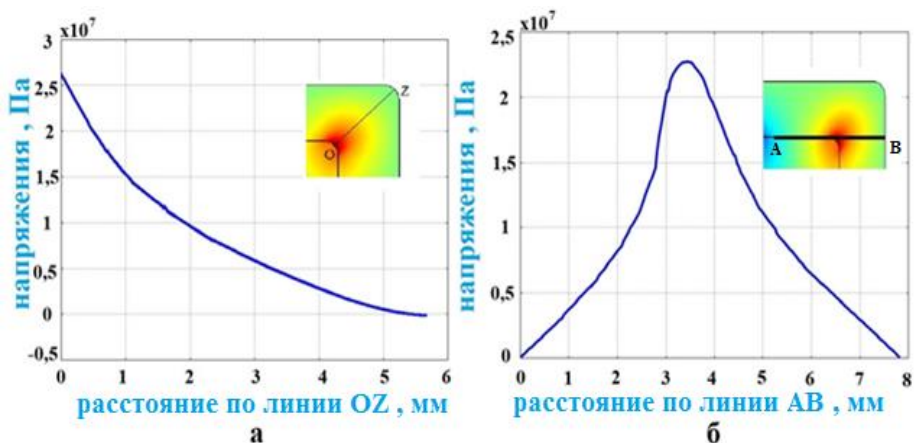


Рис. 3. Распределение напряжений для модели с закругленным ребром
а) -по линии OZ; б) - по линии AB

Максимальное тангенциальное напряжение достигло 27 МПа, а для алюминия - 70 МПа (на биссектрисе внутреннего угла, на поверхности ТВЧ – линия OZ). Однако значения адгезионной прочности на сдвиг, приведенные в [3, 5] не превышают 10 МПа. Отсюда следует вывод, что дефект в виде отслоения существует постоянно. Но это не соответствует данным [1]. Это говорит о том, что необходимо уточнить как расчетную модель в программе COMSOL, так и методику определения адгезионной прочности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хазанов А.И. Научно-технические основы контроля монолитности корпусной изоляции электрических машин высокого напряжения: дис. канд. техн. наук. / ЛПИ. - Л., 1989. – 193 с.
2. Futakawa A., Murakami A., Yamasaki S/ Interaction mechanism between conductor and ground insulation of stator windings// IEEE Transactions on El. Insulations. - 1983. - №5. - P.143 - 151
3. Шикова Т.М. Исследование и усовершенствование технологии изготовления изоляции обмоток высоковольтных электрических машин: Диссертация... кандидата технических наук; СПбГПУ. СПб, 2007. - 221 с
4. Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Сарапулов Ф.Н. Моделирование тепловых и электромагнитных процессов в электротехнических установках. Программа Comsol. Учебное пособие. – Л., изд. Спутник+, 2011. – 156 с.
5. Исследование системы изоляции токопроводов на основе слюдосодержащих лент [Электронный ресурс]: магистерская диссертация: 13.04.02 / С. М. Шергин; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт энергетики и транспортных систем; науч. рук. Т. М. Шикова - URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/v17-4075.pdf> (Дата обращения: 20.10.2019)

ВЛИЯНИЕ ЖЕСТКОСТИ МОЛЕКУЛ ПОЛИИМИДОВ НА СТАБИЛЬНОСТЬ ЭЛЕКТРЕТНОГО СОСТОЯНИЯ

На сегодняшний день полиимид является перспективным материалом, который активно изучается и производится в России и за рубежом. Благодаря своим отличным механическим и электрическим характеристикам, полиимиды нашли широкое применение в энергетике, машиностроении, электронике и т.д. В пленках полиимида наблюдается электретный эффект, который может играть как положительную роль (заряженные пленки применяются в акустических преобразователях, электродвигателях и т.д.), так и отрицательную (накопление заряда на гибких печатных платах, искажение электрического поля в кабельной изоляции).

Объектом исследования являлись полиимидные пленки с различной жесткостью молекул, структурные формулы которых приведены на рисунках 1 - 3.

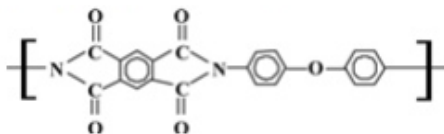


Рис. 1. Структурная формула ПИМ (Картон)

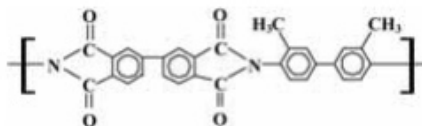


Рис. 2. Структурная формула ДФ-оТД

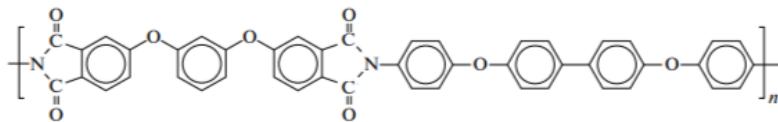


Рис. 3. Структурная формула Р-ОДФО

Целью работы является исследование влияния жесткости структуры молекулы полиимида на стабильность электретного состояния. Известно, что на жесткость молекул влияют такие показатели, как длина макромолекулы и наличие шарнирных групп (O или S) в цепи и различных группировок атомов между ароматическими кольцами [1]. Существенное влияние на жесткость молекулы оказывает расположение этих шарнирных групп относительно имидных циклов.

Пленки заряжались в коронном разряде при отрицательной полярности иглы в воздухе при комнатной температуре. Потенциал коронирующего электрода $U_k = -6\text{кВ}$, потенциал сетки $U_c = -500\text{ В}$. Зарядка происходила за счет переноса заряда из области коронного разряда к поверхности диэлектрика с последующим захватом заряда на

приповерхностные и объемные ловушки [2]. Данный способ зарядки позволяет получить электреты с гомозарядом.

Стабильность электретного состояния изучалась ускоренным методом термоактивационной спектроскопии (метод токов термостимулированной деполяризации). Нагрев образца происходил с постоянной скоростью $\beta=2^\circ\text{C}/\text{мин}$. Токи ТСД измерялись при блокирующем контакте пленки с электродом, который достигался с помощью изолирующей прокладки из пленки политетрафторэтилена (40мкм), которая помещалась на заряженную поверхность пленки.

Кривые токов ТСД представлены на рисунке 4. Из графиков видно, что высокотемпературный максимум токов ТСД у полиимида ДФ-оТД наблюдается при более высоких температурах (220°C), чем у пленок ПМ и Р-ОДФО (160°C).

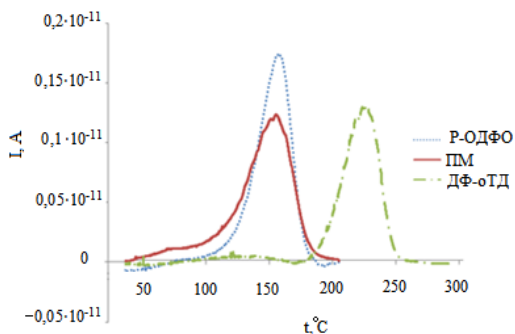


Рис. 4. Спектры токов ТСД пленок полиимидов

Анализ спектров ТСД осуществлялся методом «подгонки». Спектр ТСД анализировался на основе суперпозиции элементарных максимумов (см. рис. 5 – 7). При этом для каждого отдельного максимума учитывались значения температуры максимума и тока максимума и варьировалась энергия активации (приведены в таблице 1). Подробно этот метод описан в работе «Физика диэлектрических материалов» [3]. В работе анализировались только высокотемпературные максимумы спектров ТСД.

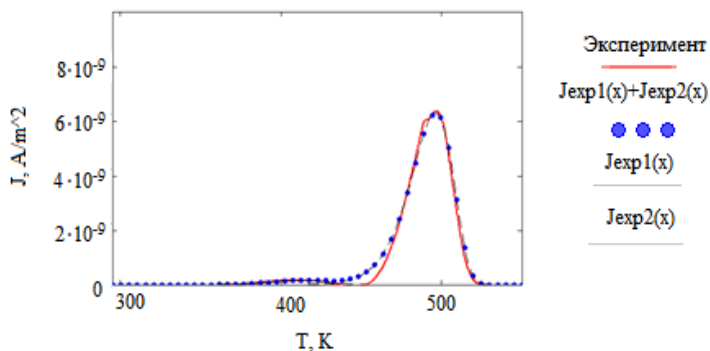


Рис. 5. Разложение спектра тока ТСД полиимида ДФ-оТД на дискретные максимумы

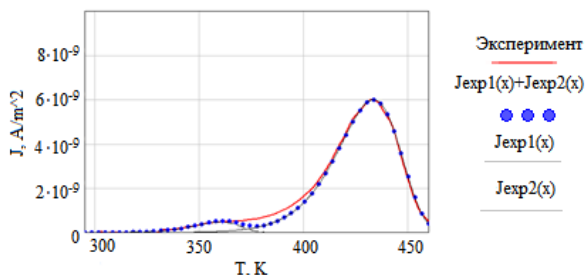


Рис. 6. Разложение спектра тока ТСД полиимида ПМ на дискретные максимумы

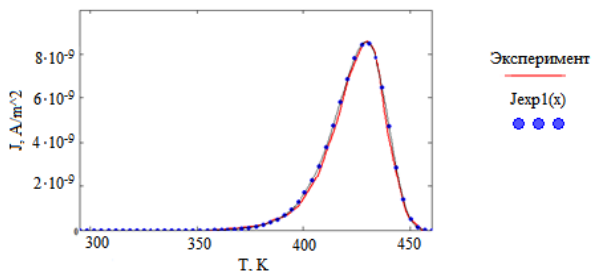


Рис. 7. Разложение спектра тока ТСД полиимида Р-ОДФО на дискретные максимумы

Таблица 1. Параметры разложения спектра токов ТСД полиимидных пленок

	$J_{\max}, \text{A/m}^2$	T_{\max}, K	$W, \text{эВ}$
ПМ	$0.6 \cdot 10^{-8}$	433.5	1.05
Р-ОДФО	$0.853 \cdot 10^{-8}$	429	1.3
ДФ-оТД	$0.63 \cdot 10^{-8}$	496	1.58

Для оценки влияния проводимости на спектры токов ТСД изучалась удельная проводимость пленок при комнатной температуре. Значения измеренной удельной проводимости пленок представлена в таблице 2.

Таблица 2. Удельная проводимость полиимидов.

	ПМ	Р-ОДФО	ДФ-оТД
$\gamma, \text{Ом}^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$	$1,1 \cdot 10^{-15}$	$1,4 \cdot 10^{-15}$	$5,0 \cdot 10^{-15}$

Экспериментальные значения проводимости существенно не отличаются и лежат в пределах одного порядка.

Метод токов ТСД позволил установить корреляцию между жесткостью молекул и энергией активации высокотемпературного максимума спектра.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бессонов М.И. Полиимиды – класс термостойких полимеров. – Изд-во «Наука», 1983.
2. Kamalov A.M., Borisova M.E. 57 Int. Scientific Conf. on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University “Specific of Electret State of Modified Polyimide Films”. Riga: RTUCON, 2016.
3. М.Э. Борисова, О.В. Галюков, П.В. Цацынкин / Физика диэлектрических материалов / ФБ СПбПУ, - 2004

СХЕМА ЗАМЕЩЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРА С ДВУМЯ ПЕРВИЧНЫМИ И ОДНОЙ
ВТОРИЧНОЙ ОБМОТКАМИ

Трансформаторы машин точечной контактной сварки имеют первичные обмотки, состоящие из несколько секций, и одну вторичную обмотку, состоящую из одного или двух витков [1]. Схемы соединения секций довольно разнообразны. Переключение секций обеспечивает ступенчатое изменение вторичного напряжения и регулирование сварочного тока. В трансформаторах для контактной сварки оплавлением несколько секции первичной обмотки соединяются параллельно. При расчете токов в этих секциях их следует рассматривать как отдельные обмотки, поэтому трансформатор контактной сварки является многообмоточным. Правильный выбор схемы секционирования первичной обмотки и расчет токов в секциях является трудной и важной частью расчета трансформатора. В настоящее время предложено много различных схем замещения многообмоточных трансформаторов [2-6]. Эти схемы основаны на приведении уравнений трансформатора к первичной обмотке и справедливы для трансформаторов с одной первичной и несколькими вторичными обмотками.

В связи с этим разработка схем замещения трансформаторов с несколькими секциями первичной обмотки и одной вторичной является актуальной при создании оборудования для контактной сварки. В настоящей статье дается схема замещения трансформатора с двумя первичными и одной вторичной обмоткой. Эта схема является основой для разработки схемы замещения многообмоточного трансформатора с несколькими секциями первичной обмотки.

Рассмотрим трансформатор с двумя первичными обмотками 11 и 12, каждая из которых подключена к своему источнику напряжения u_{11} и u_{12} , и одной вторичной обмоткой 2, к которой подключены последовательно соединенные катушка индуктивности L_H и резистор r_H . Заменяем этот трансформатор двумя двухобмоточными: первый имеет первичную обмотку 11 и вторичную 21 (трансформатор 11-2), второй трансформатор имеет первичную обмотку 12 и вторичную 22 (трансформатор 12-2). Ток в обмотке 11 обозначим как i_{11} , в обмотке 12 i_{12} , в обмотке 21 i_{21} в обмотке 22 - i_{22} . Ток во вторичной обмотке рассматриваемого трехобмоточного трансформатора можно представить в виде:

$$i_2 = i_{21} + i_{22} = -k_{11}i_{11} - k_{12}i_{12}, \quad (1)$$

где $k_{11} = w_{11} / w_2$, $k_{12} = w_{12} / w_2$, w_1, w_2, w_3 - количество витков обмоток 11, 12, 2.

Уравнения для трансформатора 11-2 представим в виде:

$$\begin{cases} u_{11} = L_{11}di_{11}/dt + r_{11}i_{11} + w_{11}d\Phi_0/dt \\ -w_2d\Phi_0/dt = (r_2 + r_H)i_2 + L_2di_2/dt + L_Hdi_2/dt \pm d(\Delta\mathcal{Y})/dt \end{cases}, \quad (2)$$

где Φ_0 - основной магнитный поток, L_{11} , L_2 - индуктивности рассеяния обмоток 11 и 2.

В (2) потокосцепление $\Delta\mathcal{Y}$ определяется магнитным потоком рассеяния трансформатора 12-2 с обмоткой 2. Выразив $d\Phi_0/dt$ из (2) и принимая во внимание (1), получим:

$$u_{11} = (L_{11,2} + k_{11}^2L_H)di_{11}/dt + (r_{11,2} + k_{11}^2r_H)i_{11} + (k_{11}k_{12}L_2 + k_{11}k_{12}L_H)di_{12}/dt + k_{11}k_{12}r_Hi_{12} + d(\Delta\mathcal{Y})/dt. \quad (3)$$

В [6], введен коэффициент M , который назван взаимной индуктивностью по потокам рассеяния:

$$M = k_{11}k_{12}L_2 + \Delta\Psi / dt . \quad (4)$$

В [6] даны методы расчета и измерения взаимной индуктивности. После подстановки M в (3), получим:

$$u_{11} = (L_{11,2} + k_{11}^2 L_H) di_{11} / dt + (r_{11,2} + k_{11}^2 r_H) i_{11} + k_{11}k_{12}L_H di_{12} / dt + k_{11}k_{12}(r_H + r_2) i_{12} + M di_{12} / dt . \quad (5)$$

Аналогично для обмотки 12 можно получить:

$$u_{12} = (L_{12,2} + k_{12}^2 L_H) di_{12} / dt + (r_{12,2} + k_{12}^2 r_H) i_{12} + k_{11}k_{12}L_H di_{11} / dt + k_{11}k_{12}(r_H + r_2) i_{11} + M di_{11} / dt . \quad (6)$$

Схема замещения, соответствующая системе уравнениям (5), (6) содержит два не связанных между собой замкнутых контура. В каждом контуре имеются последовательно соединенные независимый источник ЭДС u_{11} или u_{12} , катушка индуктивности $L'_{11} = L_{11,2} + k_{11}^2 L_H$ или $L'_{12} = L_{12,2} + k_{12}^2 L_H$, резистор $r'_{11} = r_{11,2} + k_{11}^2 r_H$ или $r'_{12} = r_{12,2} + k_{12}^2 r_H$ и зависимый источник напряжения $k_{11}k_{12}i_{11}$ или $k_{11}k_{12}i_{12}$. Все катушки индуктивно связаны между собой. Все параметры схемы можно найти из опытов короткого замыкания двухобмоточных трансформаторов, входящих в исследуемый многообмоточный трансформатор. Для расчета этих параметров можно использовать аналитические или численные методы расчета режима противовключения двухобмоточного трансформатора.

Для проверки этой схемы замещения проведен численный эксперимент на модельном трансформаторе (рис.1а). Этот трансформатор имеет ось вращения OO' , поэтому его магнитное поле является осесимметричным. Две первичные обмотки 11 и 12 соединены параллельно и подключены к источнику синусоидального напряжения. Все обмотки имеют одинаковое количество витков 55. Численный эксперимент состоит в сравнении результатов расчета токов в секциях первичной обмотки двумя способами. Первый способ – это использование разработанной схемы замещения трехобмоточного трансформатора, второй способ – расчет осесимметричного магнитного поля трансформатора с присоединенной электрической схемой соединения обмоток. Все расчеты выполнены с использованием пакета ELCUT в диапазоне изменения частоты источника от 1 Гц до 50 Гц [7].

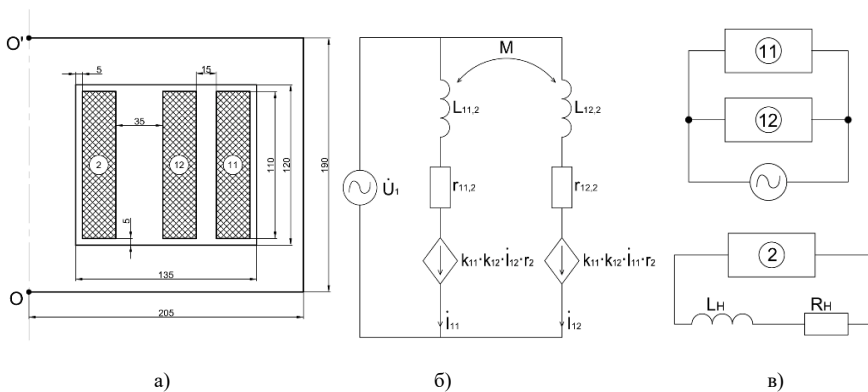


Рис.1. Модельный трансформатор
а) конструкция трансформатора, б) схема замещения, в) присоединенная электрическая цепь

Для примера на рис.16 дана схема замещения трансформатора для режима короткого замыкания, на рис.1в – электрическая схема соединения блоков обмоток в ELCUT. К обмотке 2 присоединена нагрузка L_H, r_H . Параметры схемы замещения при частотах 1 Гц и 50 Гц даны в таблице 1. В таблице 2 приведены результаты расчета токов в секциях первичной обмотки в режиме короткого замыкания, полученные двумя способами. Амплитуда первичного напряжения 8 В.

Таблица 1. Параметры схемы замещения

Частота, Гц	$\omega L'_{11}$, Ом	$\omega L'_{12}$, Ом	r'_{11} , Ом	r'_{12} , Ом	ωM , Ом
1	0,0456	0,02078	0,1011	0,0814	0,02294
50	2,28	1,03	0,1155	0,09535	1,147

Таблица 2. Результаты расчета токов

Способ расчета	Схема замещения		Магнитное поле с присоединенной цепью		
	Частота, Гц	\dot{I}_{11} , А	\dot{I}_{12} , А	\dot{I}_{11} , А	\dot{I}_{12} , А
1		-42,44+j30,31	-70,1+j21,57	-42,44+j30,31	-70,71+j21,05
50		-1,36+j8,30	0,77-j7,63	-1,30+8,35	0,75+j7,68

Расчет токов выполнен при изменении активного сопротивления нагрузки от нуля до 1 Ом, индуктивного сопротивления от нуля до 1 Ом. Результаты расчета токов двумя способами отличаются не более, чем на 1%.

Вывод. Разработана эффективная схема замещения трансформатора с двумя первичными и одной вторичной обмотками, которая может использоваться при разработке трансформаторов контактной сварки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Оборудование для контактной сварки: справочное пособие / Под ред. В.В. Смирнова. - СПб.: Энергоатомиздат. Санкт-Петербургское отделение, 2000. -848с.
2. С.Б. Васютинский. Вопросы теории и расчета трансформаторов. Энергия: ЛО, 1970,431 с.
3. Margueron X., Besi A., Lembeye Y., Keradec J.P. Current sharing between parallel turns of a planar transformer: prediction and improvement using a circuit simulation software", IEEE Trans. on Industry Application, 2010 vol.46, no.3, pp.1064-1071
4. Casimiro Álvarez-Mariño, Francisco de León and Xosé M. López-Fernández "Equivalent Circuit for the Leakage Inductance of Multiwinding Transformers: Unification of Terminal and Duality Models", IEEE Trans. on Power Delivery, 2012, vol. 27, no.1, pp.353-361
5. Francisco de León, and Juan A. Martinez, "Dual Three-Winding Transformer Equivalent Circuit Matching Leakage Measurements", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 24, no.1,2009, pp.160-168
6. Сахно Л.И. К вопросу о схеме замещения трехобмоточного трансформатора // Электричество-2003-№8-с.25-33.
7. Комплекс программ для численного моделирования электромагнитных и электромеханических устройств ELCUTwww/tor/ru/elcut.

РЕНТГЕНОГРАФИЯ КАК СПОСОБ ЭФФЕКТИВНОГО И БЫСТРОГО ОБСЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Ветроэлектрическая установка (ВЭУ) представляет собой комбинацию сложных элементов, предназначенных для преобразования механической энергии ветра в электрическую. ВЭУ, как и любое техническое оборудование, нуждается в обслуживании. Периодическая диагностика в себя включает проверку целостности и работоспособности всех узлов и механизмов, лопастей на наличие трещин и сколов. Это особенно актуально после сильного шторма и после зимы, если произошло их обледенение.

Стандартная ВЭУ состоит из более чем 8000 элементов. Доставка этих элементов до места установки, которое, как правило, находится в недоступных районах, представляет собой достаточно сложную задачу. Стоит учитывать тот факт, что в ходе транспортировки, а также ввиду возможного дефекта при производстве, несмотря на пройденный контроль качества, данные компоненты могут быть повреждены.

Для определения состояния элементов до монтажа целесообразно диагностировать их в избегании аварийных случаев (рис.1).



Рис.1. Падение ВЭУ в посёлке Куликово

Одним из наиболее эффективных и популярных методов неразрушающего контроля является рентгеновский метод. Широко используется в различных отраслях промышленности: от литейного до аэрокосмического [1]. В настоящее время появляются новые тенденции в использовании рентгеновского контроля в электросетевом комплексе в России и за рубежом. Ведутся технические разработки в области мониторинга кабельных муфт (рис.2), проходных изоляторов и др. В частности, в провинции Альберта были проведены первые испытания рентгеновского комплекса Vidisco, которая обычно используется в нефтяной промышленности, для обследования высоковольтных кабелей [2].



Рис.2. Обследование концевых муфт

Рассмотрим принцип работы рентгенокопии на примере российского комплекса «Радикс» (рис.3).



Рис. 3. Комплекс «Радикс»

При рентгеновском обследовании участвуют три базовых элемента (рис.4): рентгеновского излучатель, диагностируемый объект и рентгеновский детектор для получения цифровых снимков.

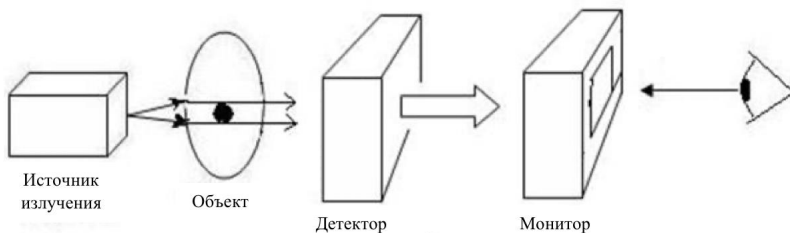


Рис. 4. Принцип действия цифровой рентгенографии

Когда рентгеновское излучение проходит через диагностируемый объект, его характеристики меняются ввиду поглощения и рассеивания внутри объекта. Изменение характеристик излучения, а именно степени его затухания, напрямую зависит от характеристик диагностируемого объекта [3] – материала, из которого он изготовлен, и физических размеров (плотность и толщина). От интенсивности и энергии рентгеновского излучения будет зависеть то, как будут меняться его характеристики при прохождении через диагностируемый объект. В свою очередь внутренние дефекты, изменение плотности материала, посторонние включения и др. оказывают влияние на интенсивность рентгеновских лучей, прошедших через объект. В соответствии с этим экспонирование детектора происходит неравномерно, в местах с дефектами попадает больше рентгеновских квантов, а где материал более плотный, кванты сохраняются в материале, и экспозиция будет меньше.

Основными параметрами во время рентгеновского контроля являются: напряжение на рентгеновской трубке, фокусное расстояние и экспозиция. Напряжение определяет проникновение излучения и контроль чувствительности.

Проникающее рентгеновское излучение не повреждает продукт, проходит через исследуемый объект к рентгеновской пленке и после его разработки предоставляется информация о внутреннем состоянии продукта, на основании которого может быть принято решение о соответствии его состояния официальной документации и паспортным характеристикам. В отличие от ультразвука рентгеновское излучение имеет более высокую проникающую способность.

Габариты элементов ВЭУ зависят от их мощности. Так, например, ветрогенератор мощностью 20 кВт может иметь диаметр лопасти 11 м, а для агрегата мощностью 7 МВт это значение достигает 140 м. Существенная разница в габаритах накладывает некоторое ограничение на использование данного метода диагностики, потому рентгеноскопия применима в большинстве случаев для малогабаритных ветроустановок мощностью до 100 кВт. Для крупногабаритных агрегатов диагностика ограничится отдельными элементами.

Применение данного метода возможно для обследования лопастей, подшипников и других частей ВЭУ. Для лопастей ввиду их длины и размера матрицы рентгеновского аппарата необходимо сделать несколько снимков. Диагностика ввиду мобильности и невысокой массы устройства для рентгенографии может проводиться на высоте, предварительно закрепив детектор на лопасти, либо на мачте ВЭУ. Процесс создания одного снимка занимает до 1 до 3 мин. По предварительным оценкам обследование одной ветроустановки должно занимать не более 20 мин.

Стоимость одного ВУЭ обычно очень высока. А окупаемость таких агрегатов составляет в среднем 20-25 лет. В связи с тем своевременная диагностика данного оборудования необходима для его правильного функционирования. Рентгеновское обследование позволяет найти уже на этапе установки возможные дефекты, не оказывая влияние на целостность оборудования, и требует небольшое количество времени, что в целом существенно увеличивает надёжность работы ВЭУ.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Лебедев М.Б., Сидуленко О.А., Удод В.А. Анализ современного состояния и развития систем цифровой рентгенографии // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т.312. № 2. С.47–55.
2. Цифровая рентгеновская технология помогает выявлять проблемы сетей // Работа энергетического предприятия. С.44-47.
3. Своллоу А. Радиационная химия органических соединений / А. Своллоу. – Издательство иностранной литературы, 1963.

ЭЛЕКТРЕТНЫЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ ПОЛИЛАКТИДА

На сегодняшний день полимерные пленки повсеместно применяются в быту и промышленности. Возникает проблема утилизации этих пленок, так как в естественной среде деградация широко используемых полимеров, например, полиэтилена, занимает сотни лет. Возможным решением этой проблемы является переход на биоразлагаемые материалы.

Полилактид (PLA) – полимер (рисунок 1), мономером которого является молочная кислота, способен быстро разлагаться в условиях окружающей среды.

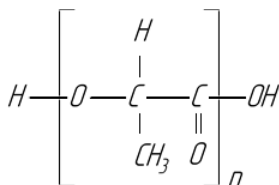


Рис. 1. Структурная формула полилактида

Диэлектрики, в которых создано неравновесное распределение зарядов, обеспечивающее существование электрического поля, называются электретами. Полимерные пленки при образовании в них устойчивого электретного состояния приобретают бактерицидные свойства, обусловленные влиянием электрического поля на микроорганизмы. Это позволяет применять подобные пленки в качестве упаковок продуктов питания и в медицинских целях.

Исходный PLA имеет слабовыраженные электретные свойства [1]. Создание композитных материалов на основе PLA позволяет улучшить эти свойства, не теряя при этом способности к биоразложению.

Объектом исследования в данной работе являются образцы полилактида с добавлением гидроксиапатита (ГА). Процентное содержание массовых долей гидроксиапатита варьировались от 0% до 5%. Образцы изготовлены в Институте высокомолекулярных соединений РАН. Гидроксиапатит является основной минеральной составляющей костей и зубов, применяется в медицине для наращивания костной ткани (часто используется как наполнитель вместо ампутированной кости), укрепления зубной эмали.

Целью работы является исследование электретных свойств композита, поиск оптимального процентного содержания наполнителя, при котором электретные свойства наиболее выражены.

Образцы заряжались в коронном разряде [2]. Зарядка в коронном разряде является наиболее распространенным методом производства электретов. Данный метод не требует сложного технического оснащения, позволяет получить электрет за короткое время (десятки секунд).

При зарядке диэлектрика в коронном разряде ионы перемещаются из области разряда на поверхность диэлектрика, происходит обмен зарядов между поверхностью и ионами [3].

При использовании данного метода получается электрет с гомозарядом. На игольчатый электрод подается отрицательный потенциал, диэлектрик размещается на заземленном нижнем электроде. Для равномерного распределения поверхностного потенциала используется металлическая сетка, расположенная в воздушном зазоре электрод-электрет. На сетку подается отрицательный потенциал, определяющий максимальное значение напряжения на образце. Процесс переноса ионов прекращается, если потенциалы сетки и поверхности диэлектрика выравниваются. Принципиальная схема зарядки образцов приведена на рисунке 2.

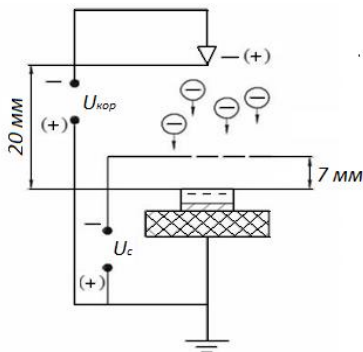


Рис. 2. Схема получения электретов с гомозарядом в коронном разряде

Разность потенциалов на образцах достигала 300 В, каждый образец заряжался 60 секунд. Зарядка проводилась в воздушной среде при комнатной температуре.

Для измерения разности потенциалов на образце был использован метод индукции с вибрирующим электродом [2]. На рисунке 3 (А) приведены зависимости электретной разности потенциалов U от времени для образцов с различным процентным содержанием ГА. Зависимости $U(t)$ получены при хранении образцов при комнатной температуре.

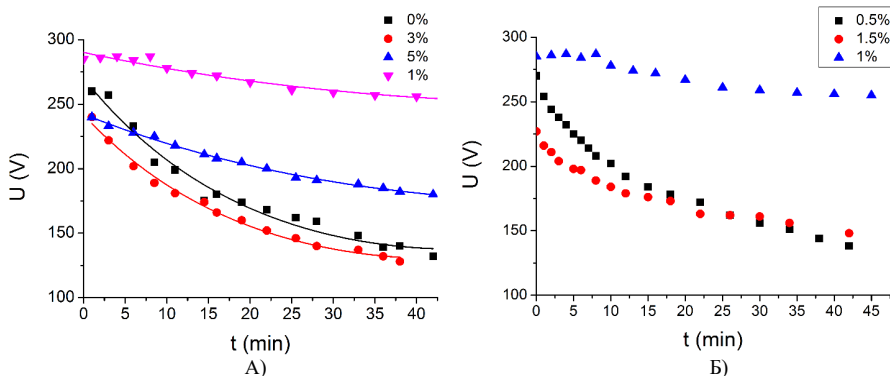


Рис. 3. А) Зависимости U от времени для образцов с 0%, 1%, 3% и 5% ГА; Б) Зависимости U от времени для образцов с 0.5%, 1%, 1.5% ГА

Из графика видно, что образец с 1% ГА сохраняет высокое значение U в течение наибольшего времени. С целью определения оптимального процентного содержания наполнителя, были дополнительно синтезированы образцы с 0.5% ГА и 1.5% ГА. Сравнение зависимостей электретной разности потенциалов U от времени для образцов с 0.5%, 1% и 1.5% ГА представлено на рисунке 3 (Б).

С повышением процентного содержания ГА зачастую требуется заряжать образец более одного раза, необходимый заряд не накапливается за отведенное время зарядки. Образец с 1% ГА стабильнее остальных накапливает и сохраняет заряд. Именно такое процентное содержание гидроксипатита следует считать оптимальным для создания композитов с улучшенными электретными свойствами. Введение наполнителя создает дополнительные уровни захвата на границе раздела полимер-наполнитель [4], что положительно влияет на способность композита сохранять накопленный заряд, но дальнейшее увеличение процентного содержания не улучшает электретные свойства, так как полученная зависимость проводимости от процентного содержания наполнителя имеет нелинейный характер (рисунок 4).

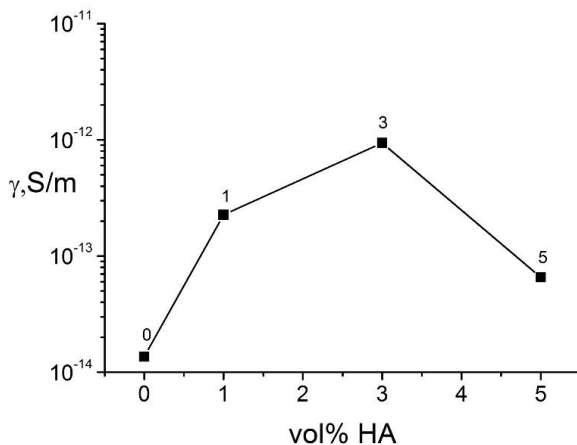


Рис. 4. Зависимость проводимости композита от процентного содержания ГА

В результате проведенных исследований было определено оптимальное процентное содержание наполнителя в композиционном материале, которое обеспечивает наиболее стабильные электретные свойства.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Игнатъева Д. А. Механизм релаксации электретного состояния в пленках полилактида с дисперсным наполнителем / Д. А. Игнатъева, Е. А. Карулина, О. В. Чистякова // Известия Российского государственного педагогического университета имени А. И. Герцена. – СПб, 2015. – № 173. – С. 39 – 45. (0,375 п.л./ 0,25 п.л.).
2. Борисова М.Э. Физика диэлектриков. Физические основы диэлектриков. – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014.
3. Vance D. W. Surface charging of insulators by ion irradiation // J. Appl. Phys. V.42, N 13. P. 5330-5443, 197.
4. Борисова М.Э., Койков С.Н. Физика диэлектриков –Л.: Изд-во ЛГУ, 1979.

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ
МЕДНО-ТИТАНОВЫХ СТЕРЖНЕЙ

В связи с потребностями гальвано-химического производства редких и цветных металлов резко увеличивается объем производства электродных материалов. В частности, Башкирский Содовый Комбинат, запланировал использовать в 2019 году 34500 медно-титановых стержней. В связи с таким большим объемом потребляемых электродов актуальным становится вопрос о контроле качества стержней. Основными дефектами стержней являются расслоения меди и титана в процессе плакирования. Это явление встречается при любом способе изготовления биметаллических стержней [1, 2]. Из-за больших объемов производимой продукции и длительности диагностики была поставлена задача автоматизации процесса выявления дефектности медно-титановых стержней.

Для этого была изготовлена автоматическая измерительная установка, которая состоит из ложа, на которое укладывается испытуемый стержень, модуля для линейного перемещения каретки, с расположенным на ней измерительным устройством и токоподводящего механизма. Установка основана на измерении электрических потенциалов на поверхности стержней (рис.1) [3 – 5].

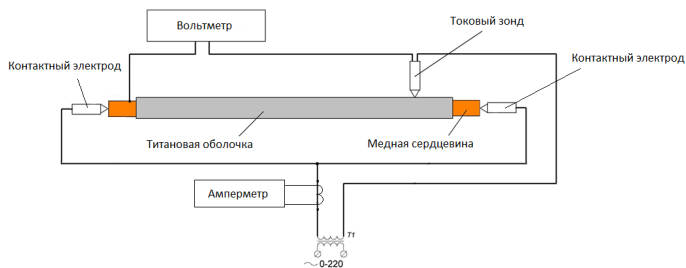


Рис. 1. Схема контроля сцепления слоев биметаллического стержня с помощью ЧЗМ

Перемещение каретки обеспечивается с помощью шагового двигателя. Токоподводящая система приводится в движение с помощью пневмо-цилиндров. Пневматический привод предусмотрен для перемещения измерительного механизма, а также для центровки его по отношению к стержню.

Была разработана программа для автоматического управления установкой [6]. Для этого был выбран одноплатный микрокомпьютер Raspberry pi 3 model B+. Программирование осуществлялось на языке Python. Управляющие сигналы подавались на шаговый двигатель, систему электропневматических клапанов, подающих сжатый воздух (с давлением 2.5 атм.) на пневмо-цилиндры и подачу напряжения на токоподводящий механизм. Для управления системой пневмо-цилиндров с помощью Raspberry использовались твердотельные реле, так как для питания пневмо-цилиндров используется напряжение 12 вольт, а Raspberry подает дискретные сигналы уровнем 3.3 вольт. Управление шаговым двигателем осуществлялось при помощи драйвера A4988 [7]. От Raspberry поступали три сигнала на драйвер: один из них отвечал за включение драйвера (enable), второй выбирал направление вращения (dir) и третий осуществлял шаги (step). Управление

первым пневмо-цилиндром, который с помощью игольчатых контактов обеспечивал подачу напряжения на медный сердечник стержня, обеспечивалось двумя сигналами от Raspberry: один из которых подавал сжатый воздух, а другой отключал подачу. Второй пневмо-цилиндр обеспечивал поперечное движение, в результате которого происходило прижатие центрирующего валика к поверхности стержня. Для этого использовался один сигнал от Raspberry, высокий уровень которого включал подачу воздуха, а низкий отключал. Третий пневмо-цилиндр осуществлял перемещение контактных электродов до соприкосновения с поверхностью стержня. Для этого использовались два сигнала: один на включение, второй на отключение подачи воздуха.

Алгоритм управления установкой состоит из восьми этапов:

1. Зажим стержня первым пневмо-цилиндром.
2. Прижатие центрирующего валика к поверхности стержня.
3. Перемещение электродов до соприкосновения со стержнем.
4. подача напряжения на электрическую часть схемы.
5. Измерение потенциала на поверхности стержня.
6. Отведение электродов.
7. Передвижение каретки в следующее положение (20мм).
8. После прохождения всего стержня возврат в исходное положение и обработка полученных данных методом фильтрации.

Для снятия потенциала с поверхности стержня используется вольтметр, который имеет возможность передавать информацию по интерфейсу rs485. Для передачи данных использовался протокол MODBUS, реализованный на языке Python. Данный интерфейс позволил совместить алгоритм управления установки и анализа полученных данных в одной среде программирования [8].

Процесс диагностики стержня можно разделить на два этапа. Первый этап включает в себя снятие показания по всей длине стержня. Второй этап заключается в анализе полученных данных. До создания автоматической установки снятие данных и их запись производились вручную, поэтому время, затраченное на снятие данных с одного стержня, составляло не менее 30 минут. Далее необходимо было внести данные в программу Matlab, в которой и производился анализ. Использование установки сокращает время диагностики одного стержня до 3 минут, а использование микрокомпьютера Raspberry позволяет произвести анализ данных. На рис.2 приведены распределения потенциалов по длине стержня полученные на описываемой установке.

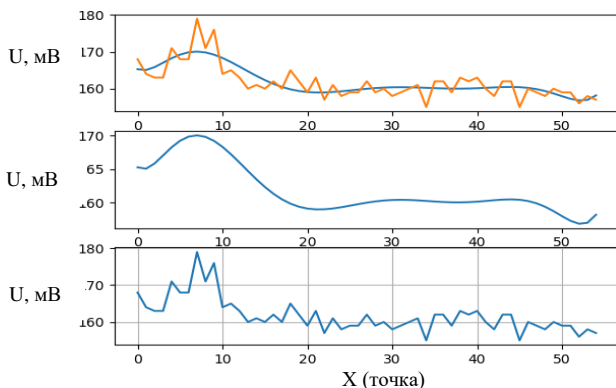


Рис.2. Распределение потенциала по длине стержня

В результате проделанной работы можно сделать следующие выводы:

1. Изготовлен блок управления установкой, состоящий из:
 - микрокомпьютера Raspberry Pi 3 с монитором 8”;
 - платы с управляющими элементами;
 - панель коммутации пневматической системы;
2. Разработана программа на языке Python, осуществляющая управление перемещением элементов установки, измерения потенциалов и токов и математическую обработку данных.
3. Проведены эксперименты на реальных стержнях промышленного производства в автоматическом режиме.
4. Полученные данные были обработаны с помощью математической фильтрации, что показало наличие дефектных зон в испытанных образцах.

Созданная установка значительно сокращает время диагностики медно-титановых стержней. Данная работа является методической частью глобальной темы по разработке методики диагностики медно-титановых стержней на выявление дефектов. Учитывая повышающийся спрос на использование электродных материалов, данная работа является перспективным проектом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Малахов А.Ю., Сайков И.В., Николаенко П.А., Первухин Л.Б. Исследование влияния сплошности соединения на эксплуатационные свойства медно-титанового токопровода // Вестник Тамбовского университета. Серия Естественные и технические науки. Физика. - 2016. - Т. 21, вып. 3. - С. 1136-1138.
2. Малахов А.Ю. Плакирование взрывом длинномерных цилиндрических изделий функциональными покрытиями. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Институт структурной макрокинетики и проблем материаловедения им. А.Г. МЕРЖАНОВА российской академии наук. Черноголовка. 2019, с.171.
3. Лукьянчиков А.Д. Выпускная квалификационная работа магистра Использование 4-зондового метода для исследования проводниковых материалов и изделий. // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Институт энергетики и транспортных систем. - Санкт-Петербург, 2018. - 123 с.
4. Клюев В.В. Неразрушающий контроль и диагностика. Т. 5. Книга 2 электрический контроль. М.: Машиностроение, 2004. 679 с.
5. Четырехзондовый метод измерения электрического сопротивления полупроводниковых материалов, Минск 1998.
6. О.С. Вадутов Математические основы обработки сигналов. Практикум: учебное пособие/ О.С. Вадутов; Томский политехнический университет. - 3-е изд., испр. и доп.- Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014 с.102.
7. ASTM Special Technical Publication 877, “Automated Test Methods for Fracture and Fatigue Crack Growth,” ed. Cullen, Landgraff, Kaisand, Amer. Soc. Test. And Mat. (1985).
8. Найда В.Л., Олейник Ю.А., Гоголя А.Н. Автоматизированный ультразвуковой контроль металлургической продукции в условиях массового производства на примере разработок ИЭС им. Е.О.Патона // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2011 № 4. С. 48-52.

УЧЕТ НЕСИНУСОИДАЛЬНОСТИ ТОКА ПРИ ВЫБОРЕ СЕЧЕНИЯ КАБЕЛЯ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ 0,4 кВ

Характерной нагрузкой сети 0,4 кВ являются электроприемники жилых зданий, офисных и торговых центров. К ним относятся осветительные и бытовые электроприборы, компьютерная техника, силовое оборудование зданий (механизмы подъема лифтов, насосы водоснабжения и водоотведения и др.). Большинство таких электроприемников при подаче синусоидального напряжения потребляют несинусоидальный ток, содержащий ток основной частоты и высших порядков. При этом значительную часть спектра тока могут составлять третья и кратные ей гармоники [1].

Несинусоидальность тока и напряжения имеет такие негативные последствия, как повышенный нагрев и ускоренный износ изоляции проводников, дополнительные потери мощности и сокращение срока службы электрооборудования. Вследствие перегрузки токами третьих гармоник возможен перегрев и разрушение нулевых рабочих проводников кабельных линий. Это происходит по причине того, что в трехфазных четырехпроводных цепях токи третьих и кратных гармоник совпадают по фазе в фазных проводниках, достигая нулевых и максимальных значений одновременно, и суммируются в нулевом проводе. В итоге токи в нулевом проводнике могут превосходить токи в фазных, а защита от токовых перегрузок в цепи нулевого проводника не предусматривается (п.1.3.10 ПУЭ). Перегрузка нулевого проводника ускоряет старение изоляции кабеля, сокращает срок его службы, может привести к обрыву нулевого проводника и повреждению оборудования у потребителя.

Целью работы является исследование спектра гармоник тока в цепи кабеля 0,4 кВ с нелинейной нагрузкой и определение поправочного коэффициента к длительно допустимому току кабеля, учитывающего влияние несинусоидальности тока на пропускную способность кабеля.

Объектом исследования является кабельное присоединение 0,4 кВ с компьютерной и люминесцентной осветительной нагрузками.

Используется силовой кабель марки ВВГ 4×25, который питает нелинейную нагрузку, в составе которой люминесцентные лампы, системные блоки, мониторы, ноутбуки, принтеры. Для измерения спектра тока используется измерительный прибор BINOM337U3.220I3.5S16T4, подключаемый через измерительные трансформаторы Т-0,66 по цепям тока и непосредственно (без измерительных трансформаторов напряжения) в сеть по цепям напряжения.

Осциллограммы токов и напряжений в фазах кабеля, полученные с помощью прибора, показаны рис. 1. В результате анализа осциллограмм следует, что форма тока несинусоидальна, при этом наиболее загруженной является фаза А, для нее производится дальнейший расчет.

В таблице 1 даны измеренные значения коэффициентов гармоник тока в фазе А, соответствующие спектру, в сравнении с нормативными значениями, установленными зарубежным стандартом IEEE 519 [2]. Стоит отметить, что согласно государственному стандарту, действующим в России, нормируются только гармоники напряжения (ГОСТ 32144-2013), требования к нормативным значениям гармоник тока отсутствуют.

Из таблицы следует, что коэффициент гармоник тока третьего порядка превышает нормативное значение в 3,8 раз, пятого порядка – в 2,2 раза. Остальные гармоники находятся в пределах норм, установленных стандартом IEEE 519.

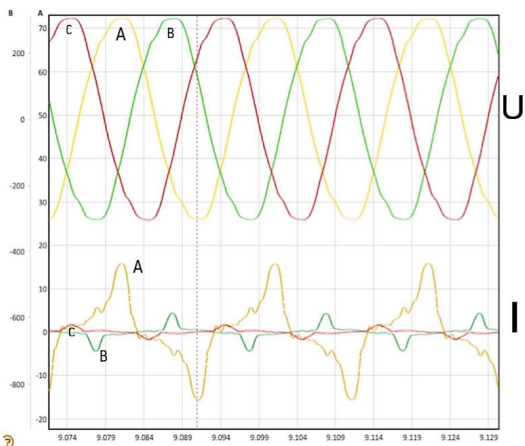


Рис. 1 Осциллограммы мгновенных значений фазных напряжений и токов

Таблица 1. Спектр коэффициентов гармоник тока и нормативные значения согласно стандарту IEEE 519

n	$K_{I(n)},\%$	Нормы IEEE 519 для $K_{I(n)},\%$
3	45,247	12
5	26,575	12
7	10,043	12
9	5,345	12
11	0,917	12
13	2,015	5,5
15	3,999	5,5
17	4,320	5
19	2,508	5
21	0,980	5

Расчет поправочного коэффициента к длительно допустимому току кабеля выполняется согласно методике, изложенной в [3].

1. Рассчитывается коэффициент добавочных потерь активной мощности в кабеле от токов высших гармоник:

$$K_{\text{доб}} = \left(1 + \sum_{n=2}^{40} (K_{I(n)})^2 \cdot A_n + 3 \cdot \frac{R_1^{\text{нул}}}{R_1} \sum_{n=3,9,\dots}^{40} (K_{1(n)})^2 \cdot A_n \right),$$

где $K_{I(n)}$ – коэффициент гармоник тока; $A_n = 0,187 + 0,532 \cdot \sqrt{n}$, n – порядковый номер гармоники; $R_1^{\text{нул}}$ – активное сопротивление нулевой жилы кабеля току основной частоты; R_1 – активное сопротивление фазной жилы кабеля току основной частоты.

2. Вычисляется коэффициент высших гармоник тока:

$$K_{\text{вг}} = \frac{1}{\sqrt{K_{\text{доб}}}}$$

3. Рассчитывается значение длительно допустимого тока кабеля основной частоты с учетом поправок на токи высших гармоник:

$$I'_{\text{доп}} = K_{\text{ВГ}} \cdot I_{\text{доп}}$$

где $I_{\text{доп}}$ – справочное значение длительно допустимого тока кабеля с поправками на температуру воздуха или почвы и на число кабелей в траншее

4. На основании данных о спектре тока вычисляется действующее значение длительно допустимого тока кабеля:

$$I''_{\text{доп}} = \sqrt{I'_{\text{доп}}{}^2 + \sum_{n=2}^{40} (K_{I(n)} \cdot I'_{\text{доп}})^2}$$

5. Поправочный коэффициент учета искажения от нелинейных потребителей:

$$K_{\text{нел}} = \frac{I''_{\text{доп}}}{I_{\text{доп}}}$$

В таблице 2 приведены результаты расчетов по приведенной методике.

Таблица 2. Результаты расчетов

$\frac{R_1^{\text{нел}}}{R_1}$	$K_{\text{доп}}$	$K_{\text{ВГ}}$	$I_{\text{доп}}, \text{А}$	$I'_{\text{доп}}, \text{А}$	$I''_{\text{доп}}, \text{А}$	$K_{\text{нел}}$	$\Delta, \%$
1	2,064	0,696	104	72,4	82,32	0,79	20,8

В результате расчета поправочного коэффициента, учитывающего влияние высших гармоник тока, для кабеля ВВГ 4×25 получено новое значение длительно допустимого тока кабеля, которое на 20,8 % меньше справочного значения.

Выводы.

1. Измерения, проведенные в цепи кабеля 0,4 кВ, питающего компьютерную и люминесцентную осветительную нагрузку, подтверждают характерный состав гармоник в потребляемом токе. Значения коэффициентов гармоник тока превышают нормативные значения, установленные стандартом IEEE 519.

2. С использованием методики [3] получено действующее значение длительно допустимого тока кабеля с учетом поправочного коэффициента на токи высших гармоник, которое меньше справочного на 20,8 %.

3. При проектировании и эксплуатации систем электроснабжения 0,4 кВ необходимо производить оценку и учет влияния высших гармоник тока на электрооборудование, что позволит продлить срок его службы и снизить аварийность в электрических сетях из-за несинусоидальности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения [Текст]: монография/ Жежеленко И.В. – 4-е изд., перераб и доп.-М.: Энергоатомиздат.2000-331с., ил.
2. IEEE Std 519–2014. IEEE Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems. – [S. l.]: IEEE Standards Association, 2014. – 29
3. Разработка методов оценки влияния нелинейных электроприемников на режимы работы оборудования распределительных сетей: диссертация / Симуткин Максим Геннадьевич. - Москва, 2014. - 163

**ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЙ БЛОК ВЕТРОГЕНЕРАТОРА С ВОЗБУЖДЕНИЕМ
ОТ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ**

Ветроэнергетика является одним из ключевых направлений в возобновляемой энергетике, которое развивается стремительными темпами. За последнее десятилетие средний ежегодный прирост установленной мощности ветроэлектростанций (ВЭС) составил около 48 ГВт. На окончание 2018 г. суммарная мощность ВЭС в мире достигла 597 ГВт, в то время как суммарная мощность атомных электростанций – 401,8 ГВт [1, 2].

В настоящее время наиболее широкое распространение получили ветроэнергетические установки (ВЭУ) с тихоходными генераторами единичной мощности от 1,5 до 3,5 МВт и переменной скоростью вращения [3]. Использование таких агрегатов предполагает наличие преобразователя частоты, включающего выпрямитель, который традиционно реализуется на базе диодной мостовой схемы.

Цель статьи – показать эффективность работы ВЭУ, которая содержит тихоходную синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов и выпрямитель с искусственной коммутацией вентилей.

Основной метод исследования – имитационное моделирование процессов в фазной системе координат. Моделирование проводилось в вычислительном комплексе «РИТМ», предназначенном для имитационного моделирования процессов в электроэнергетических системах [4, 5]. Комплекс «РИТМ» разработан в Высшей школе электроэнергетических систем Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

В качестве генератора ВЭУ предложено использовать синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов. Машина имеет на статоре две трехфазных обмотки, магнитные оси которых смещены на 30° эл. Номинальная активная мощность, напряжение и ток генератора составляют соответственно 2500 кВт, 1300 В, 650 А. Номинальная скорость вращения ротора и номинальная частота напряжения на зажимах статора составляют соответственно 15,3 об/мин и 14,28 Гц.

Теоретические вопросы математического моделирования шестифазной машины с возбуждением от постоянных магнитов изложены в [6]. На основе статьи [6] разработана макромодель машины в фазной системе координат для применения в вычислительном комплексе «РИТМ». Макромодель использует гармоническую аппроксимацию ЭДС фазной обмотки от действия постоянных магнитов 1, 3 и 5-й гармониками, аппроксимацию индуктивности фазной обмотки и взаимных индуктивностей постоянной составляющей, 2 и 4-й гармониками в функции электрического угла γ , характеризующего положение ротора.

Поскольку генератор ВЭУ шестифазный, то первоначально был рассмотрен вариант двенадцатипульсной тиристорной схемы Ларионова с естественной коммутацией, работающей в диодном режиме. Расчеты показали, что максимальная активная мощность, которая может быть получена на выходе выпрямителя, составляет около 1300 кВт.

Гармонический анализ фазных величин напряжения и тока генератора по первой гармонике для предельного режима дал следующие результаты:

$$U_{m(1)} = 664,8 \text{ В}; \quad \psi_U = -35,9^\circ$$
$$I_{m(1)} = 667,7 \text{ А}; \quad \psi_I = -46,1^\circ$$

Видно, что угол нагрузки генератора в предельном режиме $\delta = 35,9^\circ$, вектор тока отстает от вектора напряжения на угол $\varphi = -10,2^\circ$. Векторная диаграмма предельного режима генератора при использовании диодного выпрямителя приведена на рис.1а). Диаграмма показывает взаимное расположение векторов фазного напряжения на внешних полюсах генератора и фазного тока относительно поперечной оси q машины.

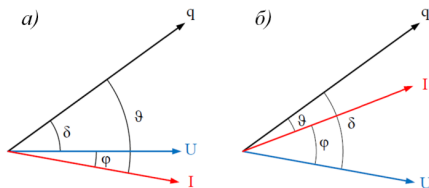


Рис.1. Векторные диаграммы: а) предельный режим при естественной коммутации вентилей; б) оптимальный номинальный режим при искусственной коммутации вентилей

Анализ результатов показал, что причиной ограничения выдаваемой активной мощности является загрузка машины генерацией реактивной мощности. Получение номинальной мощности на выходе генератора может быть обеспечено переходом к искусственной коммутации вентилей выпрямителя.

Принципиальная схема выпрямителя с блоком искусственной коммутации приведена на рис.2. Блок искусственной коммутации содержит коммутатор и трехфазную батарею конденсаторов. Каждый конденсатор имеет емкость 1200 мкФ. Суть работы схемы состоит в том, что коммутация фазного тока генератора осуществляется в два этапа. На первом этапе в момент генерации очередного импульса на вентиль коммутатора обеспечивается перевод фазного тока генератора в следующую фазу. В случае, если первоначально в проводящем состоянии находились, например, вентили T_1 и T_2 выпрямителя, то генерация управляющего импульса на вентиль T_3 коммутатора запускает процесс коммутации по контуру: T_3 - T_1 - C_1 - T_2 - C_2 , что приводит к погасанию вентиля T_1 выпрямителя. С этого момента протекание тока генератора обеспечивают вентили T_2 выпрямителя и T_3 коммутатора. На втором этапе, после достижения на коммутирующем конденсаторе C_2 нужного напряжения подается импульс на вентиль T_3 выпрямителя и по контуру: T_3 выпрямителя – T_3 инвертора – C_2 обеспечивается мгновенный перевод тока с вентиля коммутатора на вентиль выпрямителя.

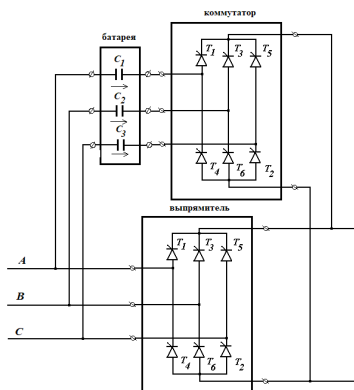


Рис.2. Выпрямитель с искусственной коммутацией вентилей

Описанный коммутационный процесс иллюстрируют осциллограммы рис.3.

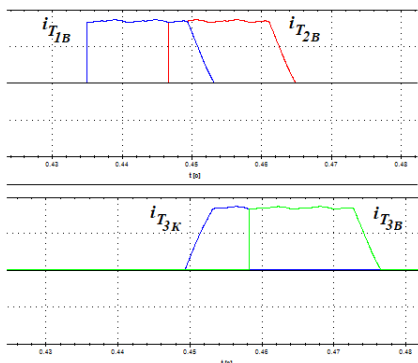


Рис.3. Осциллограммы коммутации токов.

Изложенное показывает, что использование предлагаемой схемы искусственной коммутации позволяет управлять положением вектора фазного тока генератора. При этом на выходе выпрямителя может быть получена активная мощность около 2500 кВт.

Гармонический анализ фазных величин напряжения и тока генератора по первой гармонике в оптимальном режиме номинальной мощности дал следующие результаты:

$$U_{m(1)} = 1059,2 \text{ В}; \quad \psi_U = -46,1^\circ$$

$$I_{m(1)} = 915,8 \text{ А}; \quad \psi_I = -15,2^\circ$$

На рис.1б) приведена векторная диаграмма оптимального номинального режима генератора. Видно, что угол нагрузки генератора $\delta = 46,1^\circ$, вектор тока опережает вектор напряжения на угол $\varphi = 30,9^\circ$. Это означает, что использование блока искусственной коммутации обеспечило не только разгрузку вентильной машины от генерации реактивной мощности, но и привело к изменению направления ее потока. Таким образом, применение выпрямителя с искусственной коммутацией вентилей позволяет обеспечить эффективное использование генератора ВЭУ. Потребление вентильной машиной реактивной мощности снижает внутренние потери, повышает напряжение и выдаваемую активную мощность генератора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Report The World Wind Energy Association «Wind Power Capacity Worldwide Reaches 597 GW, 50,1 GW Added in 2018». <https://wwindea.org/blog/2019/02/25/>
2. Report The International Atomic Energy Agency «Nuclear Share of Electricity Generation in 2018». <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/NuclearShareofElectricityGeneration.aspx>
3. Андреев Е.И. Природная энергия. – СПб.: 2008. – 176 с.
4. Евдокунин Г.А., Попков Е.Н. Принципы имитационного моделирования процессов в электроэнергетических системах. Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2013, №5(181), с.46-49.
5. Н.Н. Меньшиков, Е.Н. Попков, А.О. Фешин. Windows-версия вычислительного комплекса «РИТМ». Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19–24 ноября 2018 г. ИЭиТС. Ч.2. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2019. – 162 с, с.59–62.
6. Адалев А.С., Кучинский В.Г., Попков Е.Н., Фильчков А.И., Чайка В.М. Имитационная модель шестифазной вентильной машины с возбуждением от постоянных магнитов. Научно-технические ведомости СПбГПУ, 2012, №2-1(147), с.283-291.

КОМБИНИРОВАННОЕ ЗАЗЕМЛЕНИЕ НЕЙТРАЛИ В ВОЗДУШНЫХ И КАБЕЛЬНО-ВОЗДУШНЫХ СЕТЯХ ДЛЯ ИСКЛЮЧЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ НЕЙТРАЛИ И УПРОЩЕНИЯ ПОИСКА МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ПРИ ОЗЗ

Проведён анализ мероприятий по предотвращению резонансных смещений нейтрали в воздушных и кабельно-воздушных сетях с номинальным напряжением 6-35 кВ, эксплуатируемых с компенсированной нейтралью.

Введение. Согласно действующим нормам [1 – 3] сети с напряжением 6, 10, 35 кВ выполняются с изолированной (или заземленной через дугогасящий реактор) нейтралью. Упрощенная схема замещения сети представлена на Рис. 1.

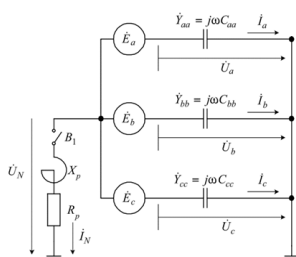


Рис. 1. Упрощенная схема замещения сети

Режим изолированной нейтрали сети при различных, в общем случае, проводимостях $\dot{Y}_{aa} \neq \dot{Y}_{bb} \neq \dot{Y}_{cc}$ (на Рис. 1. ключ B_1 разомкнут). Напряжение на нейтрали:

$$\dot{U}_N = -\frac{\dot{Y}_{aa} \cdot \dot{E}_a + \dot{Y}_{bb} \cdot \dot{E}_b + \dot{Y}_{cc} \cdot \dot{E}_c}{\dot{Y}_{aa} + \dot{Y}_{bb} + \dot{Y}_{cc}} = -\frac{\dot{E}_a \cdot (C_{aa} + a^2 \cdot C_{bb} + a \cdot C_{cc})}{C_{aa} + C_{bb} + C_{cc}},$$

где C_{aa} , C_{bb} и C_{cc} – емкости фаз относительно земли, мкФ, a – фазный множитель, равный $a = 0,5 + j\sqrt{3}/2$, $a^2 = -0,5 - j\sqrt{3}/2$.

В случае несимметрии сети $\dot{Y}_{aa} \neq \dot{Y}_{bb} \neq \dot{Y}_{cc}$, даже при уравновешенной системе э.д.с. $\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c = 0$, получаем ненулевое напряжение на нейтрали (напряжение несимметрии $U_{НС}$ [3]). Также, согласно [4], могут быть и другие причины ненулевого значения напряжения на нейтрали.

Степень несимметрии напряжений определяется по формуле:

$$U_{НС} = \frac{\dot{U}_{НС}}{U_{\phi}} \cdot 100\%.$$

Резонансное смещение нейтрали. Согласно [1 – 3] «Компенсация емкостного тока замыкания на землю в сетях 6-35 кВ применяется для уменьшения тока замыкания на землю, снижения скорости восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения заземляющей дуги, уменьшения перенапряжений при повторных зажиганиях дуги и создания условий для ее самопогасания». Там же закреплены значения емкостного тока замыкания на землю сети, при которых должна применяться компенсация.

В части настройки ДГК есть следующие рекомендации [3]: «Дугогасящие реакторы должны быть настроены на ток компенсации, как правило, равный емкостному току замыкания на землю (резонансная настройка)». Таким образом, в существующих нормативных документах для уменьшения перенапряжений при повторных зажиганиях дуги и создания условий для её самопогасания рекомендуется осуществлять компенсацию емкостного тока замыкания на землю, причём настройка ДГК должна быть близкой к резонансной, что в свою очередь, при наличии несимметрии в сети может приводить, как будет показано дальше, к резонансным смещениям нейтрали, превышающим допустимую величину (15% фазного напряжения [3]).

Рассмотрим режим при наличии дугогасящего реактора (ключ В₁ замкнут). Произведем расчет напряжения на нейтрали U_N при условии наличия несимметрии сети и при учете активного сопротивления реактора R_p, введя также коэффициент компенсации K=1/(3ω²L_pC):

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_{\text{НС}} \cdot (R_p + j\omega L_p)}{R_p + j\omega L_p(1 - K)}$$

Для K=1

$$|\dot{U}_N| = U_{\text{НС}} \sqrt{1 + \left(\frac{\omega L_p}{R_p}\right)^2}$$

Добротность реактора q=X_p/R_p=20...100 велика, поэтому напряжение на нейтрали U_N при K=1 (U_N≈q·U_{НС}) даже при небольшой несимметрии в сети (U_{НС}) может достигать опасных для изоляции величин.

Рекомендации по предотвращению резонансного смещения нейтрали в сетях 6-35 кВ. Самым эффективным мероприятием по исключению резонансного смещения нейтрали является снижение величины несимметрии до значений, близких к нулю. В кабельной сети данный эффект достигается за счёт одинаковой величины фазных емкостей КЛ (между жилой и заземлённым экраном/оболочкой), в воздушной сети это возможно только при выполнении одного из следующих мероприятий:

1. Выполнение транспозиции фазных проводов на воздушных линиях (Рис. 2.).

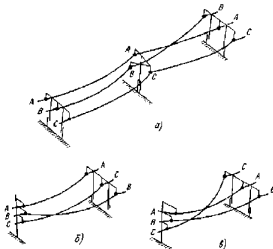


Рис. 2. Транспозиция фазных проводов на воздушных линиях [3]

Данное мероприятие, как правило, не выполняется в сетях 6-35 кВ и в большинстве случаев экономически не обосновано;

2. Перефиксация на РУ 6-35 кВ фаз ВЛ, имеющих сопоставимую протяжённость. Подобное мероприятие по своей эффективности сопоставимо с п. 1, однако, приводит к усложнению эксплуатации и увеличивает вероятность ошибки персонала, кроме того, требует применения специальных указателей фаз на ВЛ (в настоящее время подобные указатели не используются в электрических сетях 6-35 кВ);

3. Подключение симметрирующих конденсаторов. Помимо необходимости установки на подстанции конденсаторов 6-35 кВ, приводит к росту уровня токов ОЗЗ в сети;

4. Прокладка КЛ или перевод в кабельное исполнение участков ВЛ. Данное мероприятие является дорогостоящим и, аналогично п. 3, приводит к росту уровня токов ОЗЗ.

Таким образом, перечисленные мероприятия практически не применимы для существующих сетей, однако, на практике часто встречаются кабельно-воздушные сети, наличие непротяженных участков КЛ приводит к значительному снижению величины несимметрии.

Далее рассмотрим мероприятия по снижению величины смещения (включая резонансное) нейтрали:

1. Увеличение степени расстройки компенсации ДГК (перекомпенсация).

2. Установка параллельно ДГК высокоомного резистора (рис. 3) с током, не превышающим допустимой величины, позволяющей не отключать повреждение в течение времени поиска места замыкания на землю.

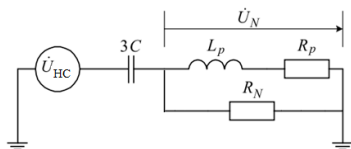


Рис. 3. Схема замещения для расчета напряжения на нейтрали U_N при условии наличия несимметрии сети и при учете резистора в нейтрали

Наличие высокоомного резистора дополнительно позволит реализовать в сети селективное определение повреждённого фидера, упростив задачу поиска места повреждения при ОЗЗ. Постоянно включенный резистор при возникновении однофазного замыкания на землю будет создавать в повреждённом присоединении заметный активный ток. Величина этого тока с учётом отстройки зоны срабатывания направленных защит на активный ток будет достаточной для работы направленных защит от замыканий на землю, таким образом может быть обеспечена селективность защит от замыканий на землю с действием на сигнал или отключением.

Заключение. В разветвлённых воздушных и кабельно-воздушных сетях в нормальном режиме работы в нейтрали может возникнуть ненулевое напряжение, вызванное несимметрией подвеса проводов на опоре воздушных ЛЭП. Наличие ненулевого напряжения в нейтрали в сетях с компенсированной нейтралью при настройке, близкой к резонансной, приводит к недопустимому резонансному смещению нейтрали со значительным увеличением фазных напряжений. Наличие кабельных вставок в значительной степени позволяет снизить величину несимметрии и смещения нейтрали. При отсутствии в сети, работающей с компенсированной нейтралью, кабельных линий из очевидных мероприятий, целесообразным является подключение параллельно ДГК высокоомных резисторов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). 7-е издание. – М.: ЗАО «Энергосервис», 2008 – 695 с.
2. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей. Издание 15-е, Москва, 1996 г.
3. Типовая инструкция по компенсации емкостного тока замыкания на землю в электрических сетях 6-35 кВ. ТИ 34-70-070-87, СПО Союзтехэнерго. М.: 1988, с. 56.
4. Gernot Druml, Andreas Kugi, Bodo Paß. Дугогасящие реакторы 6-35 кВ. Повышение точности настройки. Новости электротехники, №1(43), 2007.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ТРАНСФОРМАТОРОВ В ПЕРЕХОДНЫХ РЕЖИМАХ

В статье исследуется магнитное поле вблизи сердечника и катушек, создаваемое трансформатором ЭТЦНД-160000/35. Математическая модель реализована в программной среде Comsol Multiphysics, которая является средой моделирования, позволяющей рассчитывать любые физические процессы, которые могут быть описаны в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. В работе представлено описание математической модели, построены картины магнитного поля для режимов XX и КЗ, проведен сравнительный анализ полей по полученным результатам.

В современном мире высоких технологий и всеобщей цифровизации вычислительная мощность компьютеров стремительно дешевеет и становится все более доступной любому желающему, что позволяет рассчитывать сложные модели, например, связанные с расчётом электромагнитных полей на стандартных персональных компьютерах и ноутбуках. Однако в трансформаторостроении специалисты столкнулись с проблемой отсутствия специализированных программ для расчета магнитных полей вблизи сердечника, т.к. основной программой расчета до сих пор остается программа РЭСТ [1] (Расчет электродинамических сил в трансформаторе), разработанная в 70-80 годах и обладающая рядом ограничений и допущений, введенных в связи с техническим ограничением, накладываемым уровнем развития вычислительной техники того времени [2, 3].

Соответственно возникает актуальная проблема создания современного программного обеспечения для расчета полевых задач, целью которого может являться оценка динамической стойкости трансформаторов, поиск так называемых “узких мест” в сердечнике, приводящих к повышению потерь холостого хода, а также лучшего понимания процессов, происходящих в трансформаторе при бросках тока XX и в режиме КЗ, т.е. при насыщении сердечника.

В данной статье представлена математическая модель трансформатора ЭТЦНД-160000/35, реализованная в среде моделирования Comsol Multiphysics, которая позволяет создавать очень гибкие модели с возможностью настройки любых параметров, а также дает возможность совместно решать задачи из разных областей физики: например, расчет ЭМ полей и механических деформаций, нагрева или акустических колебаний.

Модель описывается системой уравнений Максвелла, дополненной законом Ома в дифференциальной форме [4]:

1. Электрические поля: $\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \Rightarrow \partial_t \mathbf{D} = \varepsilon \partial_t \mathbf{E}$

2. Магнитные поля: $\mathbf{H} = \mu^{-1} \mathbf{B}$

3. Закон Ома: $\mathbf{J}_f = \sigma \mathbf{E}$

4. Закон Ампера-Максвелла: $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_f + \mathbf{J}_e + \partial_t \mathbf{D}$

5. Подставляем (1), (2), и (3) в (4): $\nabla \times (\mu^{-1} \mathbf{B}) = \sigma \mathbf{E} + \varepsilon \partial_t \mathbf{E} + \mathbf{J}_e$

6. Переходим к формулировке векторного потенциала $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

7. Закон Фарадея: $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{B}$

8. Подставляем (6) в (7): $\nabla \times \mathbf{E} = -\partial_t (\nabla \times \mathbf{A}) \Rightarrow \mathbf{E} = -\partial_t \mathbf{A}$

9. Подставляем (8) и (6) в (5): $\nabla \times (\mu^{-1} \nabla \times \mathbf{A}) = -\sigma (\partial_t \mathbf{A}) - \varepsilon (\partial_t^2 \mathbf{A}) + \mathbf{J}_e$

Решаем относительно \mathbf{A} , затем рассчитываем поле как $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$

Для электрического поля:

$$-\nabla \cdot \partial_t (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla V - \mathbf{P}) - \nabla \cdot (\sigma \nabla V - \mathbf{J}_e) = Q_i,$$

которая, путем показанных выше преобразований, сводится к решению дифференциального уравнения относительно векторного магнитного потенциала, через который потом рассчитываются все остальные величины, такие как напряженность и индукция поля. Аналогично получается уравнение для электрического поля через вектор поляризации.

На рис. 1 приведены геометрия и размеры рассматриваемого трансформатора:

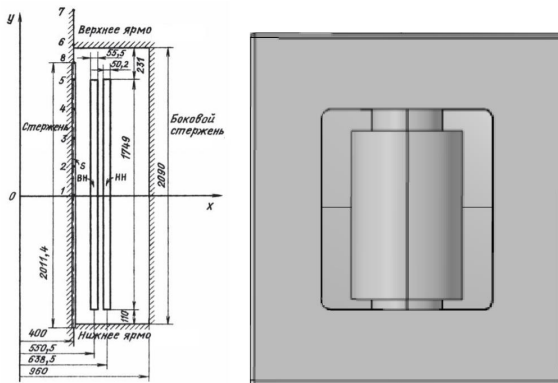


Рис. 2. Размеры и геометрия модели трансформатора ЭТЦНД-160000/35, число витков ВН=211, НН=5.

Для трансформатора были рассчитаны два режима: режим включения в сеть номинального напряжения в момент перехода напряжения через 0 на холостой ход и работа трансформатора в режиме КЗ. Ток в режиме КЗ принят синусоидальным, с амплитудой, равной амплитуде тока в режиме ХХ для того, чтобы при сравнении полей не делать поправку на различные токи.

Режим ХХ:

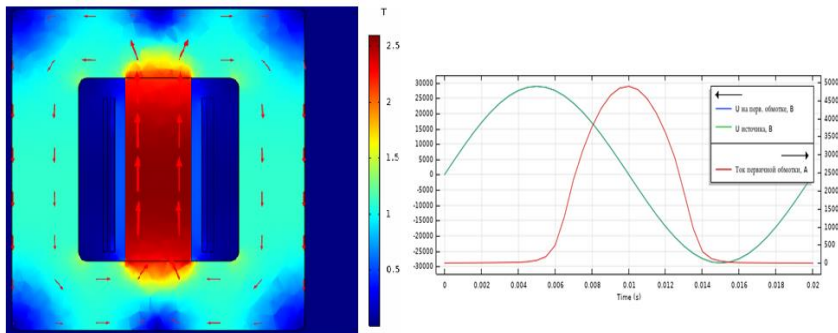


Рис. 3. Слева – картина магнитного поля вблизи сердечника в режиме ХХ в момент максимума тока, Справа – осциллограммы токов и напряжений для ХХ.

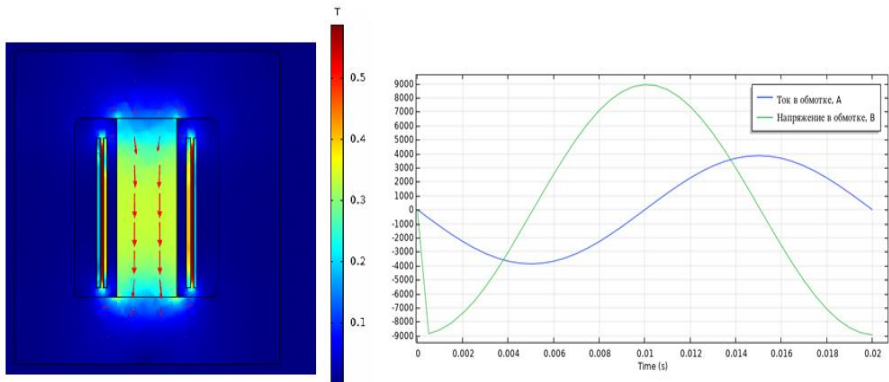


Рис. 4. Слева – картина магнитного поля вблизи сердечника в режиме КЗ в момент максимума тока, Справа – осциллограммы токов и напряжений для КЗ.

Как видно из рис. 2,3 поле при ХХ достигает величины в 2.5 Тл, что в 5 раз (2,5/0,5) больше максимальной величины поля в случае КЗ. При этом в режиме КЗ поле практически полностью сосредоточено между обмотками ВН и НН, тогда как в режиме ХХ оно замыкается по магнитопроводу. Это объясняется тем, что токи в обмотках ВН и НН в режиме КЗ протекают во встречных направлениях, и магнитные поля, создаваемые ими, компенсируют друг друга во всех областях, кроме области между обмотками.

Таким образом, предложена математическая модель для расчета магнитного поля в трансформаторе, выполнен расчет для двух режимов, для которых ожидаемо характерное насыщение сердечника, при сравнении результатов выяснилось, что в случае ХХ поле в сердечнике намного превышает таковое в режиме КЗ. Данные расчеты в дальнейшем могут быть использованы для расчетов электродинамических усилий в обмотках трансформатора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Горшунов В.Ю., Капустин Д.С. Электродинамическая стойкость силовых трансформаторов недостаточна. Новости электротехники. – 2003. - № 3 (21).
2. ГОСТ 11677-75 Трансформаторы силовые. Общие технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1982. – 27 с.
3. Хренников А.Ю. Основные причины повреждения обмоток силовых трансформаторов напряжением 110-500 кВ в процессе эксплуатации. Промышленная энергетика, 2006, № 12. -С.12-14.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле: Учебник для электротехн., энерг., приборостроит. спец. вузов. – 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. 1986. – 263 с.: ил.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УСТРОЙСТВОМ FACTS
ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Актуальность. Устройства FACTS последовательного включения, основанные на использовании силовой электроники, эксплуатируются в электроэнергетических системах в течение почти трех десятилетий [1, 2]. Их применение в основном было ограничено повышением пропускной способности протяженных линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения. За последнее десятилетие появились новые устройства FACTS последовательного включения, которые являются более экономичными и удобными в применении, чем устройства FACTS последовательного включения первых поколений, таких как устройства продольной емкостной компенсации, в том числе с тиристорным управлением [3]. Кроме того, в большинстве регионов строительство новых воздушных линий электропередачи становится все более сложным, что повышает возможности применения устройств FACTS последовательного включения для увеличения пропускной способности существующих электрических сетей и повышения качества управления потоками мощности в сложных сетях.

Цели и задачи работы. Целью настоящей работы является исследование влияния включения в линию электропередачи ЭДС источника, развивающего чисто реактивную мощность, на характеристики мощности и режимы работы одиночной электропередачи. В этом случае ЭДС источника находится под прямым углом к вектору тока линии и либо компенсирует часть падения напряжения на индуктивном сопротивлении линии, либо увеличивает его. Устройство носит название статический синхронный последовательный компенсатор (ССПК). Выводы и расчеты приведены для случая пренебрежения потерями линии.

Выражение, определяющее характеристику мощности электропередачи с последовательно включенной ЭДС для случая компенсации части падения напряжения принято в соответствии с [2]:

$$P = \frac{U_1 U_2}{x_L} \sin \delta + \frac{U_1 \Delta E}{x_L} \cos \frac{\delta}{2}, \quad (1)$$

и для случая увеличения падения напряжения:

$$P = \frac{U_1 U_2}{x_L} \sin \delta - \frac{U_1 \Delta E}{x_L} \cos \frac{\delta}{2}. \quad (2)$$

В качестве примера рассмотрена линия электропередачи напряжением 500 кВ, длиной 450 км. За базисную мощность принята мощность генератора, подключенного к линии ($P = 800$ МВт, $\cos \varphi = 0,9$). Характеристики мощности, рассчитанные по формулам (1) и (2) проведены в относительных единицах на рис. 1. Значения параметра ρ , приведенные на рис. 1, соответствуют: компенсации части падения напряжения на индуктивном сопротивлении линии ($\rho = 0$ эл. град) и увеличению падения напряжения ($\rho = 180$ эл.град.). Кривая при $S = 0$ соответствует отсутствию регулирующего устройства.

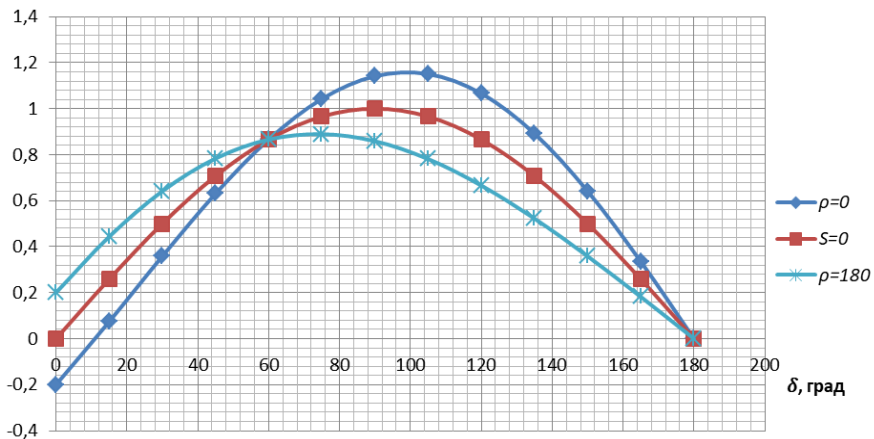


Рис. 1. Характеристики мощности электропередачи при мощности устройства $S = 0,2$ о.е. (180 МВА)

Сопоставление кривых рис. 1 показывает, что подключение дополнительной продольной ЭДС того или иного знака заметно влияет на изменение характеристики мощности электропередачи; изменение знака ЭДС обеспечивает весьма значительный регулировочный диапазон по мощности.

Дополнительная иллюстрация влияния регулирования может быть получена на основе оценки изменения режима работы линии при внесении ЭДС ССПК за счет изменения уставки устройства по току. Результаты представлены на рис. 2 и рис. 3.

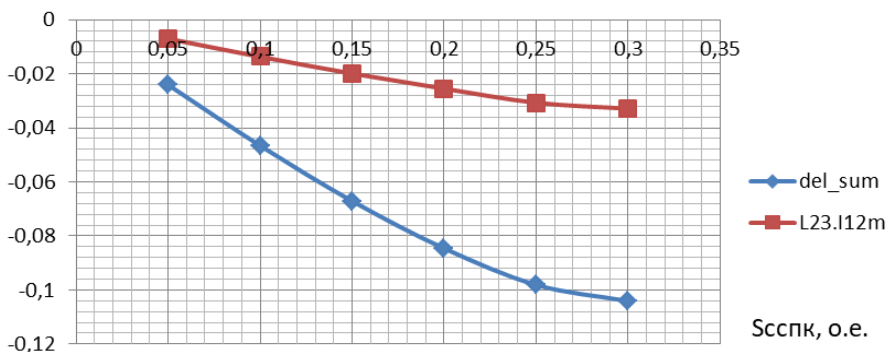


Рис. 2. Изменение угла электропередачи и тока линии при введении сигнала на компенсацию падения напряжения линии

При компенсации части падения напряжения (при мощности устройства 0,2 о.е.) угол электропередачи снижается (приблизительно на 27% начального значения угла на линии), при увеличении падения напряжения – возрастает почти на 40%. Величина тока линии в первом случае (рис. 2) незначительно уменьшается, во втором – возрастает. Это происходит за счет соответствующего изменения напряжений в точке подключения ССПК (в первом случае напряжение повышается, во втором понижается).

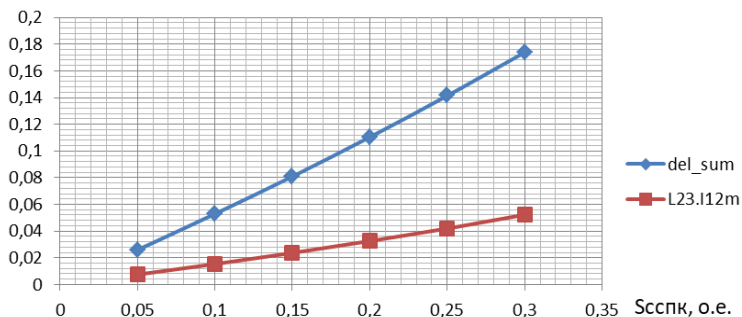


Рис. 3. Изменение угла электропередачи и тока линии при введении сигнала на увеличение падения напряжения линии

Выводы. В ходе данной работы была разработана методика моделирования устройства ССПК в условиях одиночной электропередачи. Показано заметное влияние данного устройства на режим работы электропередачи. Следует отметить необходимость продолжения исследований по выявлению возможных ограничений, обусловленных изменением напряжений на выводах устройства.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Hingorani N. G., Gyugyi L., Understanding FACTS, IEEE Press, N.Y., 2000, 428 pp.
2. Eremia M., Advanced Solutions in Power Systems, IEEE Press, 2016, 1063 pp.
3. Проект ОАО «ФСК ЕЭС» «Методика оценки технико-экономической эффективности применения устройств FACTS в ЕНЭС России» [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29-2009.pdf> (дата обращения: 10.10.2019).

УДК 621.355

А.И. Денисенко¹, Д.А. Акимов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; ²АО «ФИЦ»

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМ НАКОПЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В РАЗЛИЧНЫХ ЦЕНОВЫХ КАТЕГОРИЯХ

Как указано в [1], улучшение технико-экономических характеристик накопителей и внедрение соответствующих рыночных механизмов привели к тому, что в ближайшее время возможно резкое увеличение использование систем накопления электроэнергии (СНЭ) конечными потребителями. Перед конечным потребителем, использующим СНЭ в качестве аварийного источника питания, возникает вопрос их максимально эффективного использования, которое заключается в управлении графиком потребления, в решении задач выбора оптимальных «тарифных условий», заранее определенных государством в виде ценовых категорий на розничном рынке, характеристик СНЭ, а также построения системы ее управления, определяющей подходящее время и глубину заряда и разряда СНЭ. Цель данной работы состоит в оценке существующих рыночных тарифов на розничном рынке электроэнергии при использовании СНЭ.

Для предприятий начиная с 1 января 2012 установлены понятия шести ценовых категорий электроэнергии с различными условиями и принципами расчета стоимости электрической энергии (таблица 1).

Таблица 1. Главные характеристики ценовых категорий

№	Методика расчета	Измерение	Мощность, кВт
Одноставочный тариф на услуги по передаче электроэнергии			
1	произведение цены электроэнергии на объем потребления	по объему потребления	до 670
2	сумма стоимости электроэнергии для каждой зоны суток	по зонам суток	до 670
3	сумма стоимости электроэнергии за каждый час и стоимости мощности	почасовой учёт	любая
5	сумма фактической стоимости электроэнергии по каждому часу и сумма отклонений от плана и стоимости мощности	почасовое планирование и учёт	любая
Двухставочный тариф на услуги по передаче электроэнергии			
4	сумма стоимости электроэнергии по каждому часу и стоимости мощности	почасовой учёт	любая
6	сумма фактической стоимости электроэнергии по каждому часу и сумма отклонений от плана и стоимости мощности	почасовое планирование и учёт	любая

Рассмотрим применение СНЭ отдельно в каждой категории. Применение СНЭ с целью уменьшения затрат на электроэнергию для 1-ой ценовой категории не является возможным по причине расчета электроэнергии по месячному объему. Одним из методов сокращения затрат на электроэнергию является переход на 2-ую категорию с возможностью дифференциации по трем зонам (ночь-пик-полупик) или двум (ночь-день) и максимальный перевод потребления электроэнергии в ночное время. Однако себестоимость цикла заряда-разряда СНЭ на данный момент превышает выгоду от электропотребления в разных ценовых зонах. Достаточно ощутимый экономический эффект по снижению затрат на электроэнергию достигается в случае 3-ей ценовой категории при почасовом расчете за счет разряда СНЭ и уменьшения потребления мощности [2] из сети в отчетные пиковые часы (около 30% от общей стоимости электроэнергии на розничном рынке). Расчет стоимости электроэнергии по 3-ей ценовой категории выполняется по формуле (1):

$$C = \sum_{day=1}^{31} \sum_{h=1}^{24} W_h \cdot C_h + \sum P_{peak} \cdot \frac{C_p}{N_{peak}} \quad (1)$$

Для снижения затрат необходимо прогнозировать часы максимума региона и переводить в эти часы предприятие на электроэнергию СНЭ. Прогнозирование выполняется на основе статистики по часам максимума региона, публикуемой на сайте Администратора торговой системы ОАО «АТС». Пример графика потребления электроэнергии производственным предприятием с максимальной мощностью до 670 кВт по 3-ей ценовой категории представлен на рисунке 1.



Рис. 1. График потребления предприятия, которое управляет своим потреблением

Результатом управления стало снижение оплачиваемой мощности с 235 кВт до 80 кВт и снижение платы на 10% за потребленную мощность [3]. При выборе двухставочного тарифа 4-ой ценовой категории дополнительный экономический эффект от использования СНЭ достигается за счет снижения платы за переданную мощность в часы системного оператора (СО), в случае одноставочного тарифа - включаемую в общую стоимость оплачиваемой мощности в виде транспортной надбавки. Сверх вышеперечисленного снижение платы при 5-ой и 6-ой ценовых категориях достигается при возможности обеспечить прогноз потребления на месяц вперед по каждому часу и скомпенсировать работой СНЭ возможные отклонения, стоимость которых включается в общий счет. Стоит отметить, что цена для расчетов по факту в 5-ой, 6-ой ценовых категориях примерно на 5-7% ниже, чем для третьей ценовой категории. На рисунке 2 продемонстрированы механизмы учета электроэнергии при работе предприятия в 6-ой ценовой категории.

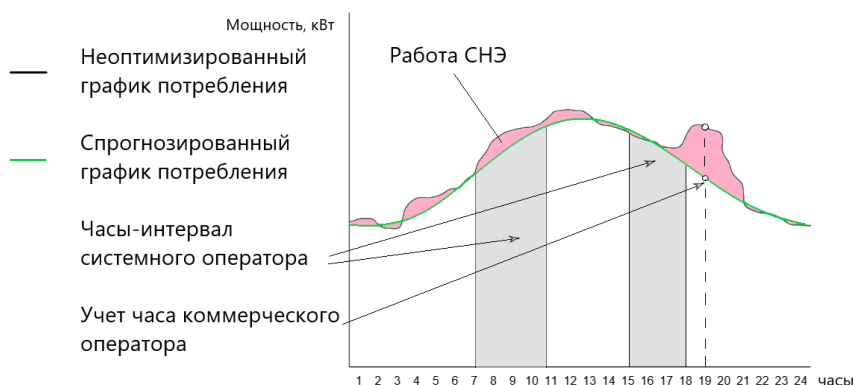


Рис. 2. График потребления предприятия с прогнозируемым потреблением

Таким образом, предприятиям, использующим СНЭ в качестве аварийного источника питания, следует уделять внимание выбору оптимальной ценовой категории розничного рынка. Так, разница между 1-ой и 3-ей ценовыми категориями может достигать до 30%, в то время как для производств с возможностью прогнозирования суточного профиля потребления с учетом сезонности разница между 1-ой и 6-ой категориями может составлять до 40% в пользу последней, что позволит значительно сократить расходы на электроэнергию.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Доклад центра стратегических разработок «Рынок систем накопления электроэнергии в России: потенциал развития» (Москва, 2018 г.) Электронный ресурс. URL: https://www.csr.ru/wp-content/uploads/2018/09/Condenses_System_Markets_Web-Fin.pdf/ (дата обращения 01.10.2019)
2. Электронный ресурс. URL: https://www.energo-konsultant.ru/sovets/elektrosnabgenie/yuridicheskim_licam/kak_sekonomit/kak_predpriyatiyu_snizit_stoimost_elektroenergii_do_30_poshagovaya_instrukciya/ (дата обращения 01.10.2019)
3. Электронный ресурс. Официальный сайт федеральной розничной энергосбытовой компания «Энергомарт». URL: <https://en-mart.com/vybor-cenovoy-kategorii-elektroenergii/> (дата обращения 01.10.2019)

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТИРОВАНИЯ ВНЕШНЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ СТАНЦИИ

Современные энергосистемы постоянно развиваются: строятся станции, линии, подключаются новые потребители; каждая новая конфигурация электросети должна быть исследована на статическую, динамическую устойчивость, настроены параметры релейной защиты, противоаварийной автоматики и в частности параметры автоматических регуляторов возбуждения на станциях. Разработано [1] достаточно большое количество методов исследования устойчивости сложных регулируемых систем: частотные методы, метод D-разбиения, определение комплексных амплитуд переменных, непосредственный учет корней характеристического уравнения, анализ решений систем дифференциальных уравнений и т.д.

Однако реализация данных методов очень трудоемкая.

Во-первых, необходимо анализировать и обрабатывать огромное количество информации, при этом в большинстве случаев, персонал станций не имеет необходимое количество данных внешней сети (параметры генераторов других станций, данные о перетоках и нагрузках в сети).

Во-вторых, с ростом сложности рассматриваемой энергосистемы растет порядок ее описывающих дифференциальных уравнений. Это обстоятельство требует от исследователя определенного уровня подготовки и квалификации. Также возникает необходимость в мощных и быстродействующих ЭВМ [2].

Для решения вышеперечисленных проблем был разработан метод эквивалентирования электроэнергетической системы [3]. Суть его в том, что внешняя сеть исследуемой станции заменяется на эквивалентную схему «линия - шины бесконечной мощности». В большинстве случаев, при исследовании устойчивости электростанций, настройки систем регулирования возбуждения определяющим является общее одночастотное движение исследуемых агрегатов относительно мощных энергообъединений. Это дает возможность заменить всю электрическую схему шинами, с неизменным по фазе напряжением U_c , расположенными в центре электрических качаний, а схему электрических соединений - единственной линией с сопротивлением X_{Σ} . Для вычисления X_{Σ} достаточно знать параметры станции в двух разных режимах (напряжение на шинах станции и выдаваемая ею активная и реактивная мощность)

Данный метод на протяжении двух десятилетий успешно применялся на пуско-наладочных работах на станциях Китая, Ирана и Болгарии. Цель данной статьи - на примере подтвердить корректность замены сложной многочастотной схемы на эквивалентную одночастотную, а также показать, как точно эквивалентная схема отражает свойства полной схемы.

Рассмотрим на примере реализацию данного метода:

На рисунке 1 изображена энергосистема, состоящая из двух станций (Г1, Г2), ШБМ, линий и нагрузок. Видно, что схема является сложной и многочастотной, так как генераторы Г1 и Г2 колеблются между собой, а также есть колебания между ШБМ и каждым генератором. Рассмотрим работу станций в разных режимах и на основании полученных данных вычислим параметры эквивалентной схемы замещения (результаты представлены в таблице 1, схема представлена на рисунке 2).

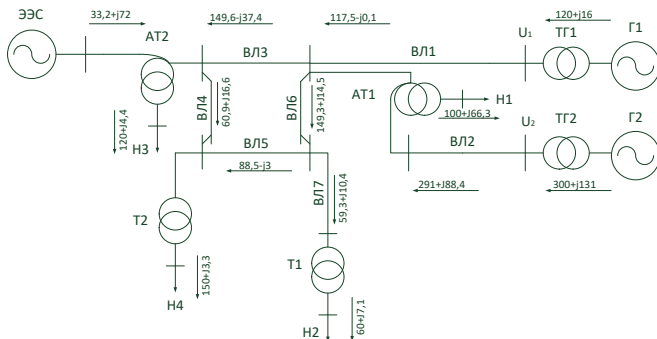


Рис.1. Схема энергорайона

Таблица 1. Результаты расчета Хвн

	P(МВар)	Q(МВар)	U(кВ)	Хвн(о.е)	Хвн(ОМ)	$S_{баз}$ (МВар)	$U_{баз}$ (кВ)
1 станция	120	46,3	10,5	0,154	0,17	100	115
	120	15,9	10				
2 станция	300	151,2	20,5	0,125	0,5		
	300	130,8	20				

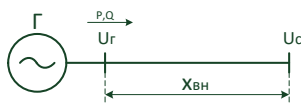


Рис.2. Эквивалентная схема

В целях сравнения свойств полной схемы и ее эквивалентной схемы, устроим трехфазное короткое замыкание на шинах генератора и найдем предельное время отключения трехфазного КЗ.

Из опыта видно (см. табл. 2), что относительная погрешность предельного времени отключения трехфазного КЗ полной схемы и эквивалентной схемы не превышает 5%.

Таблица 2. Результаты опыта КЗ

	Хвн(о.е)	$\Delta t_{пред,с}$	$\Delta t_{пред,с}$ (эквивалентная схема)	$\Delta\%$, погрешность (относительная)	$S_{баз}$ (МВар)	$U_{баз}$ (кВ)
1 генератор	0,154	0,203	0,194	4,6	100	115
2 генератор	0,125	0,138	0,133	3,7		

$$\Delta = \frac{0,203 - 0,194}{0,194} 100\% = 4,6\%$$

$$\Delta = \frac{0,138 - 0,133}{0,133} 100\% = 3,7\%$$

Сравним осциллограммы напряжения на шинах генератора и скольжения полной схемы и эквивалентной схемы, показанные на рисунках 3 и 4.

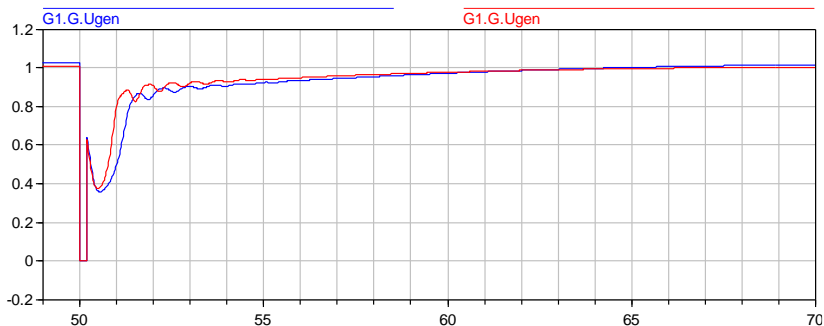


Рис.3.Напряжение на шинах первого генератора

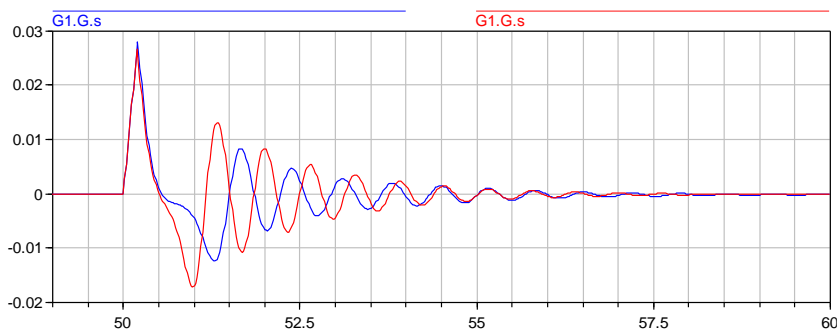


Рис.4.Скольжение первого генератора

Примечание: Синий - полная схема, Красный – эквивалентная схема
 Виден довольно схожий характер протекания процессов.

Вывод:

Рассмотренный в данной работе метод эквивалентирования имеет ряд преимуществ, среди которых простота и минимальное количество информации для его реализации. При этом эквивалентная схема достаточно точно отражает свойства полной схемы. Вот почему данный метод имеет большую практическую ценность и может быть полезен для персонала электростанций, различных проектных и исследовательских организаций.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Беляев А.Н. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах/ Беляев А. Н., Першиков Г. А., Попков Е.Н., Смоловик С.В., Чудный В.С.- СПб.: СПбПУ, 2012. 149 с.
2. Левинштейн М.Л. Операционное исчисление в задачах электротехники / М.Л. Левинштейн. -Л.: Энергия, 1972. 360 с.
3. Юрганов А.А. Регулирование возбуждения синхронных генераторов / А.А. Юрганов, В.А. Кожевников. - СПб.: Наука, 1996. 138 с.

РАСЧЕТ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЗАЕМЛИТЕЛЕЙ С ПОМОЩЬЮ
ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА COMSOL MULTIPHYSICS

Для корректных расчетов высокочастотных переходных процессов, возникающих в электрической сети необходимо иметь модели заземляющих устройств, применяемых в данной сети, которые правильно отражали бы их свойства на высоких частотах. Тем не менее, во многих работах для этого используют простейшую модель в виде активного сопротивления растеканию току. В определенных условиях высокочастотные характеристики заземлителей могут оказывать сильное влияние на величину возникающих перенапряжений. Таким образом, существует необходимость в получении точных моделей заземляющих устройств для расчетов электромагнитных переходных процессов в энергосистеме.

На данный момент, высоковольтные линии, выполненные однофазными кабелями, получили широкое распространение для электроснабжения крупных городов. Вдоль трассы кабельной линии строится множество промежуточных пунктов для соединения строительных длин кабеля, а также транспозиции и заземления его экрана. При этом качество заземления в таких пунктах гораздо ниже, чем на подстанциях. Имеются публикации [1, 2], показывающие, что параметры заземляющих устройств оказывают значительное влияние на величину высокочастотных перенапряжений на изоляции экрана кабелей, возникающих в результате коротких замыканий и при коммутациях на подстанциях. При определенных значениях сопротивления заземления такие воздействия могут стать причиной пробоя изоляции оборудования.

Для возникновения высокочастотных переходных процессов, в которых характеристики заземлителей могут играть существенную роль, в электрических сетях есть и другие условия помимо аварийных режимов. Так, широко известно [3] о возникновении импульсов токов и напряжений с частотами, достигающими десятков и даже сотен мегагерц, при коммутациях в комплектных распределительных устройствах с элегазовой изоляцией. При моделировании таких процессов также необходимо использовать точную модель заземлителя.

Для расчета параметров заземлителя с учетом их зависимости от частоты существуют аналитические выражения, но их применение ограничено определенной геометрией, для которой получены данные выражения. Для простого вертикального заземлителя сосредоточенные параметры можно определить по следующим формулам [4]:

$$\begin{aligned} R &= \frac{\rho}{2\pi\ell} \left(\ln \frac{4\ell}{r} - 1 \right) \\ L &= \frac{\mu_0\ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{r} - 1 \right) , \\ C &= 2\pi\epsilon_0\ell \left(\ln \frac{2\ell}{r} - 1 \right) \end{aligned} \quad (1)$$

где ρ – удельная проводимость земли, ℓ – длина вертикального стержня, r – его радиус.

Более универсальным подходом является численное решение полной системы уравнений электромагнитного поля для заданной геометрии и материалов заземлителя. Такой подход позволяет получать картину изменяющегося во времени электромагнитного

поля в каждой точке моделируемого объекта, что более точно отражает происходящие процессы в заземлителе.

Для численного моделирования использовался программный комплекс COMSOL Multiphysics [5]. Он позволяет решить полную систему дифференциальных уравнений Максвелла методом конечных элементов для произвольной конструкции заземлителя как в двумерной, так и в трехмерной постановке задачи. В качестве простейшей модели для демонстрации предлагаемого метода расчета заземляющего устройства был выбран одиночный вертикальный цилиндрический проводник в грунте. Осевая симметрия такой задачи позволяет использовать двумерную модель, изображенную на рисунке 1, для уменьшения вычислительной сложности и повышения точности расчета.

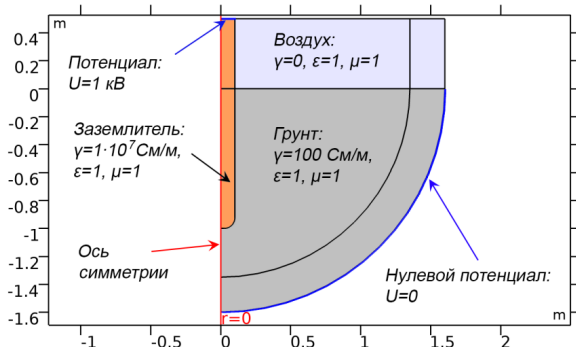


Рис.1 Модель заземляющего устройства в COMSOL Multiphysics

В качестве исходных данных в модели задаются свойства материалов (металлического стержня, воздуха, земли) и граничные условия: равенство нулю скалярного потенциала на бесконечности от заземляющего устройства и значение протекающего через него тока.

Результатом численного решения задачи являются значения скалярного и векторного потенциала во всех точках расчетной модели. С помощью инструментов обработки результатов из значений потенциалов были получены распределение плотности тока в грунте и заземлителе (рисунок 2), напряженности электрического и магнитного полей, а также сопротивления параметры, такие как сопротивление заземлителя.

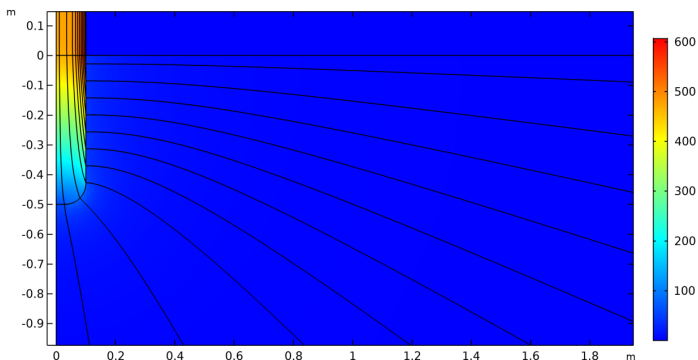


Рис.2. Распределение плотности тока на частоте $f=50$ Гц

Для определения высокочастотных параметров заземлителя были проведены расчеты модели при различных частотах напряжения, приложенного к заземляющему устройству. По полученным результатам с помощью программного комплекса АТР-ЕМТР построены графики переходных процессов, возникающих при подаче на заземлитель стандартного импульса тока (рисунок 3). По данным графикам хорошо видно влияние индуктивности заземлителя на протекание переходного процесса, проявляющейся в большой величине напряжения на заземляющем устройстве при большой крутизне изменения тока.

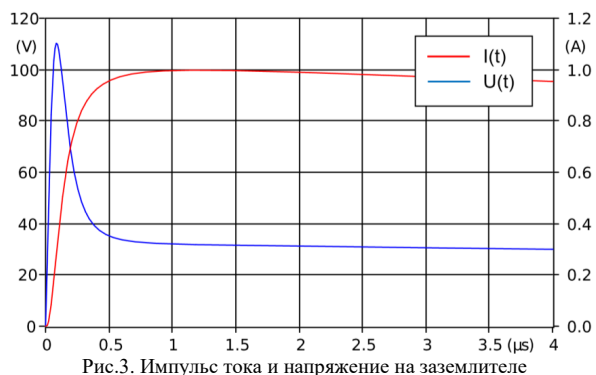


Рис.3. Импульс тока и напряжение на заземлителе

Внедрение современных видов коммутационного оборудования (элегазовые и вакуумные выключатели) требует оценки высокочастотных процессов на изоляцию электротехнического оборудования и определение безопасных условий работы персонала. Одним из аспектов такой оценки является определение характеристик заземляющих устройств в высокочастотном диапазоне. Предложенный подход к решению поставленной задачи с использованием программных продуктов, таких как программные комплексы COMSOL Multiphysics и АТР-ЕМТР позволяет оценить потенциалы, имеющие место на контуре заземления объекта и токи, протекающие, через контур заземления в режимах коммутаций и коротких замыканий. При этом могут быть смоделированы достаточно сложные конфигурации заземляющих устройств и определены требования к контурам заземления как с позиций обеспечения безопасности персонала, обслуживающего электроустановку так и с позиций воздействий высокочастотных перенапряжений на изоляции электротехнического оборудования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Бурлаков Е.С., Евдокунин Г.А., Карпов А.С., Шатилов Д.А. Высоковольтные линии с однофазными кабелями. Переходные процессы и перенапряжения // Новости ЭлектроТехники. 2016. No 5(101). С. 42–45.
2. Бурлаков Е.С., Евдокунин Г.А., Карпов А.С., Шатилов Д.А. Вспомогательное оборудование высоковольтных кабельных линий. Анализ причин повреждаемости // Новости ЭлектроТехники. 2017. No 2(104)-3(105). С. 70–73.
3. H. Xue, A. Ametani and J. Mahseredjian, “Very Fast Transients in a 500 kV Gas-Insulated Substation,” IEEE Trans. Power Del., vol. 34, no. 2, pp. 627–637, Apr. 2019
4. L. Greev and M. Popov, “On high-frequency circuit equivalents of a vertical ground rod,” IEEE Trans. Power Del., vol. 20, no. 2, pp. 1598–1603, Apr. 2005.
5. COMSOL Multiphysics Simulation Software [Электронный ресурс]. URL: <https://comsol.com/comsol-multiphysics> (дата обращения: 10.10.2019)

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ВОЗБУЖДЕНИЯ НА КРУТИЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВАЛОПРОВОДОВ МОЩНЫХ
ТУРБОАГРЕГАТОВ

Конструктивной особенностью современных мощных турбогенераторов является наличие на одном валу с генератором и турбиной еще одной мощной электрической машины - возбудителя, работающего в неустановившемся режиме. Это привело к тому, что наряду с необходимостью исследования экстремальных скручивающих моментов, вызываемых конечными переходными процессами в электроэнергетической системе (ЭЭС), также необходимо рассмотрение маловозмущенных процессов, причиной появления которых являются приложенные к валопроводу взаимосвязанные электромагнитные моменты генератора и возбудителя.

Вал турбоагрегата представляет собой сложную колебательную систему с большим количеством степеней свободы, в которой возможно развитие и длительное существование опасных для конструкции турбоагрегата многочастотных процессов. Характер этих процессов зависит от электромагнитных моментов генератора и возбудителя, в свою очередь определяемых связью генератора с ЭЭС и работой автоматического регулятора (АРВ). Поэтому демпферные свойства турбоагрегата должны исследоваться на основе комплексной модели, включающей математические описания валопровода, генератора (с учетом условий его присоединения к ЭЭС), возбудителя и АРВ.

Разработанная математическая модель включает в себя синхронный генератор, описываемый системой уравнений Парка-Горева с учетом быстропереходных процессов статорной цепи [1, 2]. Это обусловлено тем, что одной из основных причин, вызывающих высокочастотные колебания валопровода, является знакопеременная составляющая электромагнитного момента. Математическая модель синхронного генератора дополнена уравнениями, описывающими АРВ сильного действия с каналами регулирования по отклонению и производной напряжения, по отклонению и производной частоты напряжения и по производной тока возбуждения, дополненная математической моделью независимой тиристорной системы возбуждения.

Валопровод мощного турбоагрегата представляет собой сложную колебательную систему с частотной характеристикой, имеющей резко выраженные резонансные пики. Наиболее существенные частоты валопровода находятся в диапазоне 8-60 Гц и характеризуются достаточно низкими показателями демпфирования. Математическое моделирование крутильных колебаний проводится на основе его представления системой сосредоточенных масс, соединенных между собой упругими безинерционными связями и совместного решения уравнений движения этих масс и уравнений переходных процессов турбогенератора [3]:

$$J_B \frac{d\omega_B}{dt} = C_{Г-В} \cdot (\delta_G - \delta_B) + H_{Г-В} \cdot (\omega_G - \omega_B),$$

$$J_G \frac{d\omega_G}{dt} = M_e + C_{1-Г} \cdot (\delta_1 - \delta_G) + H_{1-Г} \cdot (\omega_1 - \omega_G) - C_{Г-В} \cdot (\delta_G - \delta_B) - H_{Г-В} \cdot (\omega_G - \omega_B),$$

$$J_1 \frac{d\omega_1}{dt} = M_1 + C_{2-1} \cdot (\delta_2 - \delta_1) + H_{2-1} \cdot (\omega_2 - \omega_1) - C_{1-Г} \cdot (\delta_1 - \delta_G) - H_{1-Г} \cdot (\omega_1 - \omega_G) - \alpha_1 \cdot \omega_1,$$

.....

$$J_{n-1} \frac{d\omega_{n-1}}{dt} = M_{n-1} + C_{n-(n-1)} \cdot (\delta_n - \delta_{n-1}) + H_{n-(n-1)} \cdot (\omega_n - \omega_{n-1}) - C_{(n-1)-(n-2)} \cdot (\delta_{n-1} - \delta_{n-2}),$$

$$- H_{(n-1)-(n-2)} \cdot (\omega_{n-1} - \omega_{n-2}) - \alpha_{n-1} \cdot \omega_{n-1}$$

$$J_n \frac{d\omega_n}{dt} = M_n - C_{n-(n-1)} \cdot (\delta_n - \delta_{n-1}) - H_{n-(n-1)} \cdot (\omega_n - \omega_{n-1}) - \alpha_n \cdot \omega_n,$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_c, i=B, \Gamma, 1, \dots, n.$$

где: δ_i – угол закручивания i -й массы, рад; ω_i – частота вращения, рад/с; M_i – вращающий или тормозящий момент, приложенный к соответствующей массе, Н·м; J_i – момент инерции соответствующей массы, Н·м·с; C_i – жесткость участка соответствующего участка валопровода, Н·м·с; H_i – коэффициент демпфирования крутильных колебаний, определяемый внутренним трением в материале, Н·м·с; α_i – коэффициент демпфирования, обусловленный разностью частоты вращения лопаток турбины относительно парового объема, Н·м·с².

Опыт эксплуатации мощных турбоагрегатов свидетельствует о случаях поломок участка вала между генератором и возбудителем из-за возникновения в АРВ-СД паразитного контура с собственной частотой, близкой к соответствующей собственной частоте валопровода. Демпферные свойства системы оценивались по величине степени колебательной статической устойчивости, под которой понимается модуль вещественной части левого корня характеристического уравнения, ближайшего к мнимой оси комплексной плоскости. Величина степени колебательной статической устойчивости характеризует наибольшую постоянную времени затухания свободных состоящих переходных процессов и дает представление о его длительности, а, следовательно, и о демпферных свойствах системы.

Для системы дифференциальных уравнений турбоагрегата с учетом уравнений, описывающих крутильные колебания его валопровода был проведен расчет собственных значений матрицы, результаты которого приведены в табл.1.

Таблица 1. Корни характеристического уравнения, соответствующие одиночной передаче с турбогенератором ТВВ-200-2

№ п/п	Вещественные	Мнимые	№ п/п	Вещественные	Мнимые
1-2	-18,645	314,1	16	-25,833	0,0
3-4	-0,0249	407,2	17-18	-0,6593	11,86
5-6	-0,0310	191,4	19	-7,7660	0,0
7-8	-0,0949	174,3	20-21	-3,7012	2,879
9-10	0,2142	125,7	22-23	-2,4873	2,297
11	-39,305	0,0	24	-0,4210	0,0
12-13	-36,304	89,84	25	-3,8899	0,0
14	-13,994	0,0	26	-1,0169	0,0
15	-33,077	0,0			

Следует обратить внимание на комплексную пару корней характеристического уравнения 9-10, соответствующую нижней собственной частоте валопровода, которая находится в правой, положительной полуплоскости корней. Тот факт, что вещественная часть характеристического числа имеет положительный знак, обуславливает длительное существование колебаний валопровода между возбудителем и генератором на частоте 125,7 рад/сек (20 Гц). Существование таких колебаний может вызвать поломку данного участка валопровода и привести к необходимости отключения блока.

Как показали исследования, появление этой положительной пары корней вызвано обратной связью, обусловленной связью АРВ-СД, тиристорного преобразователя, возбудителя и валопровода. Последовательное отключение каналов регулирования АРВ-СД показало, что данная обратная связь осуществляется через канал регулирования по производной частоте напряжения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Важнов А.И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Л.: Энергия, 1980. 170 с
2. Беляев А.Н., Першиков Г.А., Попков Е.Н., Смоловик С.В., Чудный В.С. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах: учебное пособие. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. 157 с.
3. Шхати Х.В., Кадхем Б.Т., Беляев А.Н., Смоловик С.В. Формы крутильных колебаний валопровода турбоагрегата // Электрика – 2014 – №11 – С.2-9.

УДК 621.31

Ф.А. Китаевич, А.А. Юрганов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА ДЛЯ ПРОВЕРКИ И НАЛАДКИ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ МАШИН

Система автоматического регулирования возбуждения (САРВ) является единственной системой, позволяющей в реальном времени управлять переходными процессами синхронных машин (генераторов и двигателей). Для исследования эффективности систем управления возбуждением и обеспечиваемого ими качества регулирования необходимы испытания в условиях предстоящей работы оборудования. Наладочные работы [1], которые обычно производят с САРВ можно условно разделить на:

- работы на стадии разработки и производства опытного образца в соответствии с ТЗ;
- работы на стадии производства серийных образцов;
- работы на стадии пуско-наладочных работ;
- работы на стадии планово-предупредительных работ.

В настоящее время из них выполняются непосредственно на работающем объекте, что требует значительных затрат времени и энергоносителя, а также иногда просто невозможно в полном объеме (в опасных для объекта режимах) [2].

ООО «НПП «Русэлпром – Электромаш» был разработан программно-аппаратный диагностический наладочный комплекс (НДК) «ДИАНА», обеспечивающий наиболее полную диагностику и настройку системы регулирования возбуждения в режиме реального времени при остановленном генераторе или двигателе (рис. 1). Он включает в себя цифровую модель простейшей энергосистемы с возможностью настройки ее параметров, набор цифровых моделей возбудителей различных типов и комплект аналоговых усилителей, обеспечивающих выдачу сигналов 3х100 В напряжения и 2х5 А тока статора генератора, смонтированные в одном корпусе. На вход комплекса подается цифровой выходной сигнал реального АРВ, аналоговые выходы подключаются к входным измерительным цепям шкафа системы возбуждения.

Модель «машина-линия-шины бесконечной мощности» правильно отражает работу отдельной синхронной машины в мощной энергосистеме. Однако она не отражает реальные переходные процессы в автономных энергосистемах, связанные с изменением частоты при изменении баланса мощностей в течение переходного процесса. Кроме того, в существующем ПО не предусмотрены сбросы и набросы местной нагрузки на шинах

машины или станции. Это существенно ограничивает область применения НДК «ДИАНА-4».

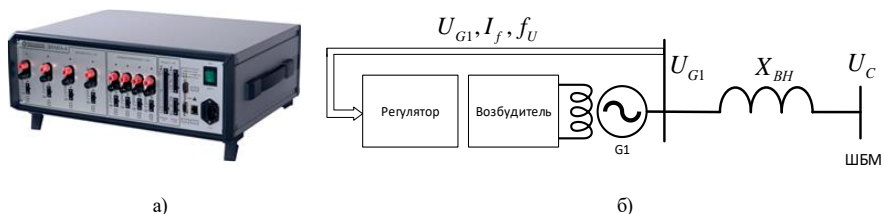


Рис. 5. Внешний вид НДК «ДИАНА-4» (а) и реализованная в нем модель энергосистемы (б)

В настоящий момент России достаточно много технологически изолированных и удаленных систем энергоснабжения [3], большая их часть расположена в зоне Крайнего Севера и приравненных к нему территориях: отдельные районы Республик Саха (Якутия) и Карелия, Мурманской, Архангельской, Магаданской, Амурской и Сахалинской областей, Камчатского края, Чукотского АО, Ханты-Мансийского АО — Югры и Ямало-Ненецкого АО. Эти территории характеризуются относительно небольшой численностью населения: на северные территории приходится около 20% площади и не более 2% населения России. Одной из главных проблем для потребителей электрической и тепловой энергии изолированных энергосистем является их недостаточная надежность.

В связи с этим целесообразна модернизация программного обеспечения комплекса, которая обеспечит возможность проверки и наладки САПВ синхронных машин, работающих в автономных энергосистемах.

Разработана и переведена в коды технологического контроллера модель двухмашинной ЭС (рис. 2).

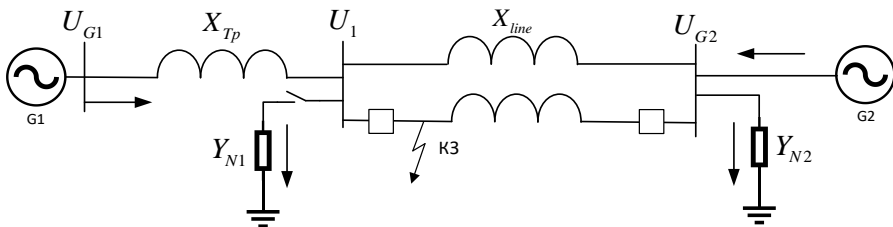


Рис. 6. Новая модель энергосистемы

Синхронный генератор моделируется уравнениями Парка-Горева при использовании общепринятых допущений, используемых для исследования электромеханических переходных процессов [4], а именно:

1. Не учитывалось насыщение стали магнитопровода;
2. Не учитывались быстропереходные процессы статорных цепей;
3. Магнитная система и обмотки ротора симметричны относительно осей d и q, а обмотки статора относительно осей a, b, c;
4. Существует единый для всех эквивалентных контуров СМ магнитный поток взаимной индукции и независимые от него и друг от друга потоки рассеяния контуров;

5. Распределение кривых магнитной индукции в зазоре синхронной машины является синусоидальным.

Турбина [5] представлена моделью системы «золотник – сервомотор – обратная связь – паровой объем» для паровых турбин без промежуточного перегрева пара.

$$\tau_c \frac{d\mu}{dt} = -\mu - \frac{s}{\sigma} + \mu_0, M_T = \begin{cases} \mu, & \mu \geq 0 \\ 0, & \mu < 0 \end{cases}.$$

Нагрузки N1 и N2 моделируются шунтами постоянной проводимости [6].

Передача мощности происходит таким образом, что оба генератора питают нагрузку N2. Активная мощность от генератора G2 в линию не поступает. Такой подход даёт возможность учесть взаимное влияние роторов машин, а также изменения частоты в системе, что не позволяет ранее использованная схема.

Таким образом, разработка новой модели энергосистемы и ее реализация в НДК «Диана-4» позволит проверять работу системы управления возбуждением при работе генератора в изолированном районе и при работе в составе автономных ЭЭС. Это позволит значительно ускорить и удешевить процедуры проверки и настройки системы управления возбуждением за счет проведения работ при остановленном генераторе. В настоящее время работа внедряется в ООО «НПП «Русэлпром – Электромаш».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Тимощенко Константин Павлович. Разработка алгоритмов автоматизированного цифроаналогового стенда для испытаний систем возбуждения электротехнических комплексов: диссертация кандидата технических наук: 05.09.03 / Тимощенко Константин Павлович; [Место защиты: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Национальный минерально-сырьевой университет "Горный"], 2014. - 141 с.
2. Бенисович, И.С. Диагностический наладочный комплекс Диана. / И.С. Бенисович, К.П., Тимощенко, В.В. Кичаев, А.А. Юрганов // Электротехника. - 2008. - № 4. С. 33-38.
3. Григорьев, Л. Энергоснабжение изолированных территорий в России и мире. / Григорьев и др. // Энергетический бюллетень – 2017 - №51. С. 14-18.
4. Беляев А. Н. Электромагнитные переходные процессы в электроэнергетических системах. / Беляев А. Н., Першиков Г. А., Попков Е. Н., Смоловик С. В., Чудный В. С. - СПб.: СПбГПУ, 2012. 149 с.
5. Павлов Г.М. Автоматизация энергетических систем. – Л.: 1977
6. Беляев А. Н. Смоловик С.В. Программирование на примере электроэнергетических систем. / Беляев А. Н., Смоловик А. Н., - СПб.: СПбГПУ, 2006. 114 с.

УДК 621.316.13

Н.О. Шкитина¹, Д.А. Акимов², И.П. Волтов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
²АО «ФИЦ»

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОРМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СТОХАСТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ОТ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ НА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНУЮ СЕТЬ

Нагрузка на распределительную сеть от электромобилей является стохастической, так как у этой нагрузки существует ряд случайных параметров, а именно: время подключения к сети, место подключения к сети, а также время зарядки до следующего передвижения. Для анализа влияния такой нагрузки на распределительную сеть необходимо пользоваться

специальными вероятностными методами, в частности для дальнейшего изучения будет использован метод Монте-Карло [1]. Для применения этого метода необходимо смоделировать анализируемую случайную величину, а именно стохастическую нагрузку от электромобилей. Эта нагрузка зависит от времени подключения электромобиля к сети и времени его зарядки. Именно эти параметры определяют количество подключенных к сети электромобилей в каждый момент времени.

Известно, что наиболее часто встречаемое в природе и в статистике распределение – нормальное распределение или распределение Гаусса. Формула функции плотности вероятности нормального распределения представляется в следующем виде:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

В связи с этим наиболее часто именно его используют для моделирования случайных величин, к которым в том числе относятся время подъезда электромобиля к зарядной станции и время его зарядки. В частности, в ряде работ в качестве распределения для времени подъезда электромобиля к зарядной станции использовалось нормальное распределение с различными параметрами [2, 3].

В данной работе было проведено исследование реальных данных по передвижению электромобилей с целью выяснения, подчиняются ли эти наблюдения нормальному распределению и, как следствие, можно ли моделировать стохастическую нагрузку от электромобилей с помощью распределения Гаусса.

В качестве исследуемых данных использовались результаты наблюдений проекта «My Electric Avenue» [4], в котором ставились задачи по изучению перемещения электромобилей и времени их зарядки с целью дальнейшего предотвращения перегрузки электрической сети. Наблюдения проводились за добровольцами в разных районах Англии с января 2013 до декабря 2015. Обезличенные результаты (см. рисунок 1) наблюдений были выложены в открытый доступ для обработки и включали в себя дату и время подъезда каждого электромобиля к зарядной станции, дату и время отключения от сети, уровень заряда батареи в начале и в конце зарядки, а также информацию о поездках, а именно дату и время начала поездки, дату и время конца поездки, пройденное расстояние и затраченную энергию.

Для обработки был выбран промежуток времени с января 2015 года до декабря 2015 года в связи с тем, что именно в последний год в исследовании было максимальное количество участников.

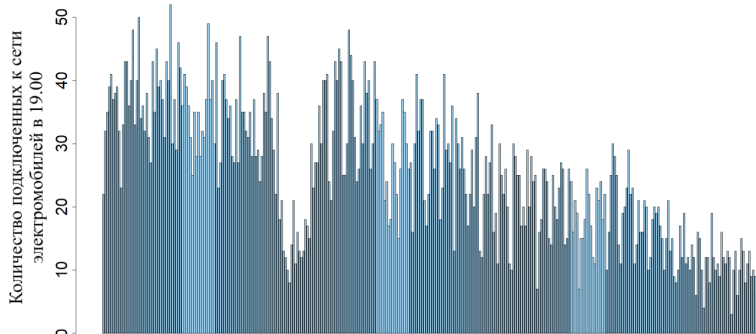


Рис. 1. Количество подключенных к сети электромобилей в 19.00 по дням в ходе проведения наблюдения проекта «My Electric Avenue» с января 2015 года по декабрь 2015 года

Из всех наблюдений были отобраны те электромобили, которые были подключены к электрической сети и заряжались в момент вечернего пика, а именно в 19.00. Для каждого дня было просуммировано количество электромобилей, таким образом было получено количество заряжаемых электромобилей в пик нагрузки для каждого дня в течение 11 месяцев, показанное на рисунке 2.

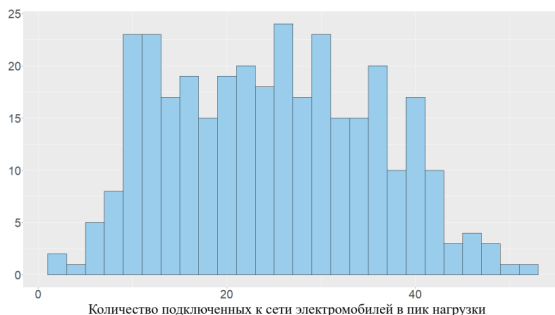


Рис. 2. Вероятностное распределение количества электромобилей, подключенных к сети в пик нагрузки в ходе проведения наблюдения проекта «My Electric Avenue» с января 2015 года по декабрь 2015 года

Также было построено вероятностное распределение количества подключенных в пик нагрузки электромобилей в виде гистограммы. Она имеет форму купола, что соответствует нормальному распределению, однако также имеет два ярко выраженных пика, что указывает на возможное отклонение от нормального распределения. Однако судить о том, можно ли моделировать стохастическую нагрузку от электромобилей с помощью нормального распределения только по графику распределения вероятности нельзя, поэтому были проведены несколько тестов на нормальность.

Первым был использован простейший тест на нормальность, а именно построение графика квантиль-квантиль [5]. На этом графике показывается связь между наблюдаемыми значениями переменных и теоретическими квантилями. Показателем совпадения теоретического распределения с наблюдаемыми данными является приближенность точек к 45-градусной базовой линии. В качестве теоретического распределения было выбрано нормальное распределение, а в качестве наблюдаемых значений было взято количество подключенных к сети электромобилей в пик нагрузки. Серым цветом на рисунке 3 обозначен 95 процентный доверительный интервал.

Уже по этому простейшему визуальному способу видно, что распределение не является нормальным, особенно в областях большого и малого количества электромобилей. Однако визуальной оценки недостаточно для однозначного утверждения о нормальности распределения. Для подтверждения этой гипотезы были проведены более сложные и более точные тесты на нормальность, а именно критерий Шапиро-Уилка [6].

Критерий Шапиро-Уилка используется для проверки так называемой нулевой гипотезы: «случайная величина распределена нормально». При этом достигаемый уровень значимости (или пи-величина, p), являющийся наименьшей величиной уровня значимости, при которой нулевая гипотеза отвергается, берется 0,05. В ходе проверки исследуемого распределения на нормальность было получено значение $p = 8,763 \cdot 10^{-5}$, что является значительно меньше принятой величины, а значит нулевая теория отвергается и распределение не является нормальным.

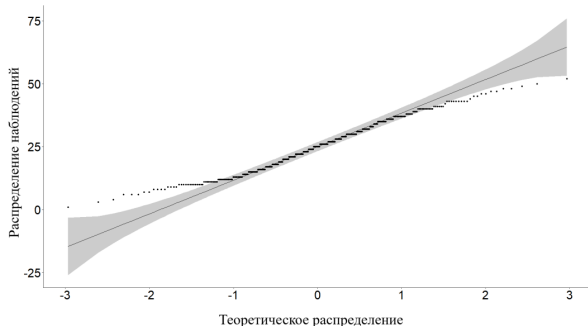


Рис. 3. График квантиль-квантиль распределения количества электромобилей, подключенных к сети в пик нагрузки в ходе проведения наблюдения проекта «My Electric Avenue» с января 2015 года по декабрь 2015 года

Полученный результат говорит о том, что моделирование стохастической нагрузки на распределительную сеть от электромобилей с помощью нормального распределения приведет к значительной погрешности, так как реальное распределение отличается от нормального. В связи с этим рекомендуется выбрать другой метод моделирования стохастической нагрузки от электромобилей на распределительную сеть.

ЛИТЕРАТУРА:

1. «Метод Монте Карло» URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Метод_Монте-Карло
2. Q. Yan, C. Qian, B. Zhang and M. Kezunovic Statistical Analysis and Modeling of Plug-in Electric Vehicle Charging Demand in Distribution Systems. 19th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems (ISAP), 2017.
3. S. Liasi and M. Golkar Electric Vehicles Connection to Microgrid Effects on Peak Demand with and without Demand Response. 25th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2017), 2017.
4. «About the Project “My Electric Avenue”» URL: <http://myelectricavenue.info/about-project>
5. «Графики квантиль-квантиль» URL: <http://statistica.ru/glossary/general/grafiki-kvantil-kvantil/>
6. Shapiro, S. S.; Wilk, M. B.: An analysis of variance test for normality (complete samples), *Biometrika*. 52 (3–4), 1965.

УДК 621.3

М.К. Рябинина, А.А. Кузнецов

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПАРАДОКСЫ ВЛИЯНИЯ УРОВНЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОПЛАТУ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

На то, что некорректный выбор напряжений, поддерживаемых в нагрузочных узлах, может заметно сказаться на величине оплачиваемого электропотребления было обращено внимание еще 35 лет тому назад [1]. Однако идеи энергосберегающего регулирования напряжения практически не реализуются.

В данной статье ставится вопрос о необходимости регулирования напряжений по специфическим энергосберегающим критериям. Такие подходы принципиально отличаются от реализуемого в ПАО «ФСК ЕЭС» на сегодняшний день.

О том, что мощность нагрузки в СЭ зависит от уровней напряжения можно наглядно убедиться, осциллографируя трехфазные напряжения и токи на головной подстанции с

последующим вычислением активных и реактивных мощностей. На рис. 1 показаны подобные процессы в одной из СЭ при возникновении изменений напряжения в моменты переключения анцапф трансформаторов главной понизительной подстанции (ГПП).

Зависимости мощностей нагрузок от напряжения в соответствующих службах энергосистем обозначают как статические характеристики нагрузок по напряжению [2] (СХН).

Существование СХН активной нагрузки преимущественно связано с зависимостями от напряжения КПД электрооборудования электропотребителей (ЭП). Рост реактивной мощности нагрузок при увеличении напряжения в значительной степени связан с нелинейными шунтами намагничивания трансформаторов и электродвигателей.

На практике в СЭ стремятся поддерживать напряжение не ниже $U_{ном}$ и во многих случаях повышенным до 5 % [3]. Возникающее при этом дополнительное оплачиваемое электропотребление подлежит минимизации соответствующим регулированием напряжения.

При оценке проявлений СХН будем ориентироваться на простейшую одноузловую схему замещения СЭ, представленную на рис.2, связанную с центром питания через эквивалентные сопротивления сети r_3 и x_3 .

Рассмотрим зависимость оплачиваемой нагрузки от напряжения.

При расчетах установившихся режимов энергосистем с учетом СХН представляют мощности нагрузок в виде полинома второго порядка от напряжения $U = U_0 + \Delta U$:

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \frac{U}{U_0} + a_2 \frac{U^2}{U_0^2} \right); \quad Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \frac{U}{U_0} + b_2 \frac{U^2}{U_0^2} \right), \quad (1)$$

где индекс «0» помечает напряжение и мощности в исходном, условно считающимся нормальным режиме, и значения коэффициентов «а» и «б» подобраны при условии $a_0 + a_1 + a_2 = b_0 + b_1 + b_2 = 1$.

В интересующей нас задаче энергосберегающего регулирования напряжения для анализа достаточно диапазона изменений напряжения в пределах $\pm 5\%$ от номинального. Поэтому зависимости (1) с целью получения относительно простых, но достаточных по точности формул могут быть линеаризованы. Для этого примем условия $a_2 = b_2 = 0$, $a_0 = 1 - a_1$, $b_0 = 1 - b_1$ и обозначим $a_1 = K_P$, $b_1 = K_Q$, $\Delta U/U_0 = \delta U$ (изменение напряжения относительно исходного значения). Тогда мощности (1) примут вид:

$$P = P_0(1 + K_P \cdot \delta U); \quad Q = Q_0(1 + K_Q \cdot \delta U). \quad (2)$$

Безразмерные коэффициенты K_P и K_Q могут быть представлены в виде

$$K_P = \frac{\Delta P/P_0}{\Delta U/U_0}; \quad K_Q = \frac{\Delta Q/Q_0}{\Delta U/U_0}, \quad (3)$$

и названы регулируемыми эффектами соответственно активной и реактивной нагрузок по напряжению. Они показывают на сколько процентов изменится мощность нагрузки при изменении напряжения на $\delta U = \pm 1\%$.

Регулирующие эффекты активной мощности могут изменяться в диапазоне $0 \div 2$ при наиболее часто встречающихся случаях для СЭ промышленных предприятий $K_P = 0,3 \div 0,5$ и для городских сетей $K_P = 0,5 \div 1,0$.

Характерные значения коэффициентов K_Q при отсутствии в сетях компенсирующих устройств типа КБ составляют $K_Q = 2,0 \div 3,0$. При наличии таких устройств целесообразно в расчетах представлять их как отдельную отрицательную по величине реактивную нагрузку с регулирующим эффектом $K_{Qку} = 2,0$.

В СЭ, где была получена регистраграмма рис.1, расчетные значения регулирующих эффектов составили $K_P = 1,7$ и $K_Q = 3,5$.

Зависящая согласно (2) от отклонения напряжения δU составляющая мощности нагрузки $P_0 K_P \delta U$ должна минимизироваться как не совершающая полезной работы и относящаяся к дополнительным оплачиваемым потерям в сетях и электрооборудовании потребителя.

Один из возможных алгоритмов регулирования состоит в поддержании только в нагрузочных узлах наиболее удаленных ЭП напряжения, на 5 % меньше номинального ($\delta U_{уд,доп} = -5\%$), с тем, чтобы у большинства ЭП это напряжение было ближе к $U_{ном}$. При предварительно оцененных в конкретной СЭ величинах среднего регулирующего эффекта нагрузки K_P и относительного отклонения напряжения $\delta U_{уд}$ у наиболее удаленного от центра питания ЭП относительная доля $\Delta P_{потр}/P_0$ практически беззатратного снижения потребления мощности может быть оценена по формуле:

$$\delta P_{потр} = \frac{\Delta P_{потр}}{P_0} \cong \frac{P(\delta U) - P_0}{P_0} = K_P (\delta U_{уд} - \delta U_{уд,доп}). \quad (4)$$

Например, при $\delta U_{уд,доп} = -5\%$ и часто наблюдаемых условиях $K_P = 0,5$ и $\delta U_{уд} = 0\%$ снижение потребления мощности $\delta P_{потр}$ составит $0,5 \cdot [0 - (-5)] = 2,5\%$.

Опасаться, что понижение напряжения будет наносить ущерб потребителям, полезная работа которых связана с нагревом, нет оснований, так как за счет небольшого увеличения длительности нагрева выполнение работы будет успешно завершено. Для подобных потребителей регулирующий эффект потребленной энергии по напряжению близок к нулю.

Если по условиям надежности работы СЭ в аварийных и послеаварийных режимах возникают опасения выставлять пониженные напряжения в длительных установившихся режимах, можно предусматривать автоматическое повышение напряжений в относительно коротких интервалах времени таких режимов.

Реализации регулирования напряжений в определенной степени препятствует крайняя ограниченность в средствах изменения напряжений в сетях 6-10 и 0,4 кВ. Для большинства ЭП использование РПН трансформаторов ГПП недоступно. К тому же имеются ограничения по числу срабатываний РПН в течение суток. Дискретность ступеней регулирования РПН также мешает выполнению энергосберегающего регулирования напряжения. Значимость эффектов уменьшения оплаты электроэнергии оправдывает усилия по их реализации. При определенных условиях могут окупаться затраты на дорогостоящие стабилизаторы напряжений для сетей (0,4 ÷ 10) кВ, включаемые в головные цепи питания нагрузок.

При выполнении расчетов по оптимизации режимов электропотребления следовало бы оперировать зависимостями от напряжения потребленных энергий W_P , зависящих от усредненных отклонений напряжения на расчетных интервалах времени

$$W_P = W_{P0}(1 + K_{WP} \cdot \delta U); \quad K_{WP} = \frac{W_P/W_{P0}}{U_{cp}/U_{cp0}}. \quad (5)$$

Регулирующие эффекты K_{WP} несколько отличаются в меньшую сторону от регулирующих эффектов мощности K_P . Проведение таких расчетов следует выполнять с использованием временных графиков нагрузок.

Итак, возможность практически беззатратного уменьшения оплачиваемой мощности нагрузки СЭ является парадоксом, связанным с наличием СХН нагрузок. В разветвлении работ в этом направлении заинтересованы, в первую очередь, электропотребители.

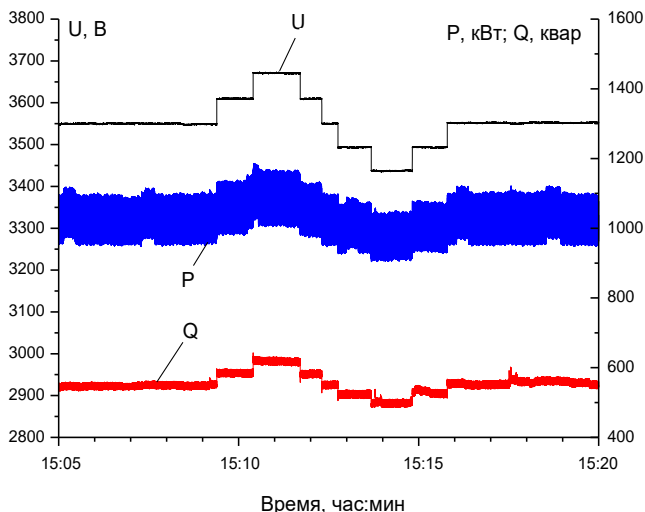


Рис.1. Изменение во времени активной и реактивной мощностей при переключении анцапф трансформатора на ГПП системы электроснабжения.

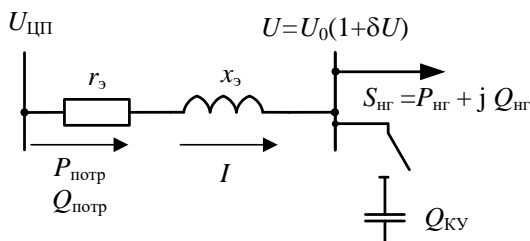


Рис.2. Простейшая одноузловая схема замещения СЭ.

Реализация обсуждаемых в статье энергосберегающих критериев регулирования напряжений на основе объективно существующих зависимостей мощностей нагрузок от напряжения может позволить без дополнительных затрат снизить электропотребление на несколько процентов. Энергетическим службам промышленных предприятий следует рекомендовать проводить расчеты возможного уменьшения потребления, используя, например, формулу (4), для чего предварительно сделать оценки поддерживаемых напряжений и регулирующего эффекта активной нагрузки K_p .

ЛИТЕРАТУРА:

1. Маркушевич Н.С. Регулирование напряжения и экономия электроэнергии. М.: Энергоатомиздат, 1984, 214 с.
2. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Зависимость нагрузки и потерь мощности от напряжения. Реальность повышения потребления электроэнергии. Новости ЭлектроТехники, 2018, №2(110).
3. Кучумов Л.А., Кузнецов А.А. Энергосберегающее регулирование напряжения в узлах нагрузки, Новости ЭлектроТехники, 2018, №5(113)-6(114).

СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ДАЛЬНИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ
СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Идея создания глобальной энергосистемы высказана давно, в том числе советскими учеными-энергетиками Ю.Н. Руденко и В.В. Ершевичем [1], и направлена на получение преимуществ от слияния электроэнергетических систем и энергообъединений. Эти преимущества заключаются в реализации возможностей передачи электроэнергии из районов, богатых первичными энергоресурсами, в районы, где имеется их недостаток, в снижении суммарного резерва мощности, повышении надежности энергоснабжения, эффективности работы электростанций различного типа, снижении максимума нагрузки и, тем самым, потребностей в установленной мощности и др.

В большой степени эта идея отражает тенденцию к масштабному переходу от углеводородного топлива для электростанций к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), которые зачастую находятся на значительных расстояниях от центров потребления. Большинство развитых стран в перспективе планирует значительную долю энергопотребления покрывать за счет ВИЭ, к которым относятся гидро-, ветро- и солнечные ресурсы [2].

Особенность развития современной электроэнергетики состоит в одновременном оптимальном покрытии имеющегося графика нагрузок путем комбинирования работы двух разных по построению, параметрам и назначению энергетических систем. Одной, включающей в себя мощные концентрированные источники генерации и протяженные магистральные (системообразующие) линии электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения (в том числе, межгосударственные), и другой, состоящей из множества локальных энергосистем с источниками распределенной генерации относительно небольшой мощности и сетями низкого и среднего напряжения, позволяющими осуществлять автоматический контроль и управление процессами генерации и потребления электроэнергии.

Повышение в последнее время интереса к созданию глобальной суперсети [3] связано, во-первых, с успехами в создании технологии передачи значительных объемов электрической энергии на сверхдальние расстояния и, во-вторых, с тенденциями наращивания использования возобновляемых источников энергии.

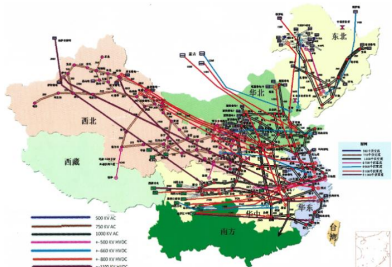
Существуют отдельные проекты частей глобальной энергосистемы: проект Gobitec, проект суперсети юго-восточной Азии, проект iceLink. В частности, китайская суперсеть предназначена для использования солнечных и ветровых ресурсов севера и гидроэнергетики юга и передачи электроэнергии на юго-восток на основе использования линий сверхвысокого и ультравысокого напряжения как переменного, так и постоянного тока. Было принято решение о строительстве 12 межрегиональных линий электропередачи, которые должны быть введены до 2020 г. (рис. 1, а) [4].

В России на данный момент активно осваивается природный потенциал Сибири и Дальнего Востока. Основная роль электропередач будет заключаться в создании электрического транзита Восток- Запад по нескольким направлениям (северное, центральное, южное). Перспективным классом напряжения в России остается 1150 кВ переменного тока и $\pm 500 \dots 800$ кВ постоянного тока [5]. Рассматриваемая схема развития сети решает проблему присоединения к ЕЭС России изолированных энергосистем и энергорайонов. (рис.1, б)

По мере увеличения длины линий электропередачи и объединения энергетических

систем возникают проблемы с реализацией режимов передачи мощностей, как по условию устойчивой работы, так и из-за недопустимого повышения напряжения в промежуточных точках линии. Для увеличения предельной передаваемой мощности и улучшения условий статической устойчивости было предложено использование синхронного компенсатора (СК) небольшой мощности в дополнение к управляемому шунтирующим реакторам (УШР). Синхронный компенсатор, установленный на линии, в нормальном режиме не потребляет и не выдает реактивную мощность. Поэтому значение его номинальной мощности составляет порядка 3–5% от мощности генератора. Совместное применение СК ограниченной мощности и мощных УШР позволяет снять какие-либо ограничения на длину линии переменного тока.

а)



б)



Рис. 1. Схема китайской «суперсети», состоящей из 12 системообразующих линий электропередачи (а) и возможный сценарий развития энергосистемы России (б)

Исследования дальних линий электропередач велись неоднократно [6, 7], они касаются вопросов оценки допустимости установившихся режимов, предельных передаваемых мощностей, а также статической и динамической устойчивости.

Рассмотрим упрощенную модель линии электропередачи длиной 4000 км класса напряжения 1150 кВ, которая разбита на восемь участков по 500 км (рис. 2), где в каждом узле установлен статический тиристорный компенсатор (СТК), с одним СК, расположенным в середине линии.

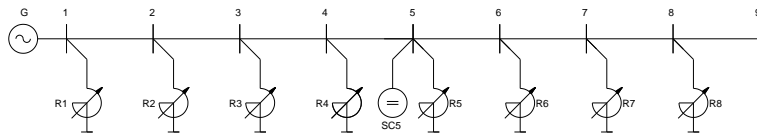


Рис.2. Упрощенная схема электропередачи длиной 4000 км

Структурные схемы систем регулирования были дополнены следующими обратными связями: в СТК были введены каналы по производной напряжения и току линии; в АРВ СК добавлены обратные связи интеграла напряжения, производных тока статора и ротора; в АРВ генератора добавлен канал по производной тока возбуждения. Всего оптимизируется 52 параметра (пять в АРВ генератора, семь в АРВ СК и по пять в каждом СТК).

Сравнивая полученные результаты (табл. 1) видно, что при $\alpha_0 = -3$ 1/с, режим передачи натуральной мощности имеет хороший запас по колебательной устойчивости, но в остальных случаях этот запас снижается. В то же время, при $\alpha_0 = -1.5$ почти все режимы держатся на одном уровне по запасу колебательной устойчивости. Таким образом, может быть целесообразно выбрать более робастную настройку, обеспечивающую достаточное

демпфирование ($\alpha_0 = -1 \dots -1.5$ 1/с) в большем диапазоне схемно-режимных условий, чем получить максимально возможные показатели только в одном из них и его окрестностях.

Таблица 1. Доминирующие собственные числа при различных схемно-режимных условиях

S _{СК} =720 МВА, U=1,05 о.е., $\square_0 = -3$ 1/с					
P=0	P=0,1	P=0,4	P=0,8	P=1	P _{пред} =1,21
-3.22 ± j18.06	-3.3 ± j18.07	-3.39 ± j18.09	-3.37 ± j17.98	-3.31 ± j17.86	-3.21 ± j17.69
-3.13	-3.12	-3.14	-3.09	-3.07 ± j0.99	-2.99
-2.35	-2.69 ± j0.86	-2.75 ± j0.72	-2.3	-3.01 ± j1.37	-2.28
-1	-2.35	-2.35	-1.7 ± j3.36	-2.96 ± j0.67	-1.39 ± j1.26
-0.63	-1	-1	-1	-2.36	-1
-0.29 ± j2.71	-0.4	-0.27 ± j3.3	-0.16	-1	-0.06
	-0.19 ± j2.65	-0.21		-0.16	
S _{СК} =720 МВА, U=1,05 о.е., $\square_0 = -1,5$ 1/с					
P=0,1	P=0,4	P=0,6	P=1	P=1,18	P _{пред} =1,34
-3.15 ± j18.05	-2.98 ± j18.11	-2.89 ± j18.11	-2.69 ± j18.06	-2.56 ± j18.02	-2.42 ± j17.95
-1.69 ± j0.08	-1.66	-1.76 ± j4.74	-2.55 ± j4.56	-1.62	-1.62
-1.02 ± j0.53	-1.4 ± j4.72	-1.65	-1.84	-1.02 ± j0.8	-1
-1	-1.13 ± j0.45	-1.14 ± j0.57	-1.07 ± j0.74	-1	-0.97 ± j0.84
-0.94 ± j3.84	-1	-1	-1	-0.1	-0.01
	-0.38	-0.3	-0.28		

Анализируя режимы работы протяженной линии электропередачи длиной 4000 км с восьмью участками при одновременной оптимизации 52 параметров и при мощности СК 720 МВА был получен достаточно большой предел передаваемой мощности 1.21 о.е. Кроме того, можно показать, что внедрение обратных связей в СТК и СК по полному углу на передаче приводит к увеличению предела передаваемой мощности до величины 1.34 о.е., что обеспечивает хороший запас по статической устойчивости.

Благодаря приведенным исследованиям можно сделать вывод о том, что электропередача переменного тока сверхвысокого класса напряжения длиной порядка 4000 км может работать в режиме передачи мощности больше натуральной с 20% запасом по статической устойчивости и сохранять динамическую устойчивость при значительных возмущениях, что показывает хорошую перспективу для развития глобальной энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Yu. Rudenko, V. Yershevich. Is it possible and expedient to create a global energy network? // International Journal of Global Energy Issues, 1991, Vol. 3, № 3, p. 159–165.
2. S. Chatzivasileiadis, D. Ernst, G. Andersson. The Global Grid, Renewable Energy, 2013, vol. 57, p. 372–383.
3. C.W. Gellings. A Globe-spanning Supergrid. IEEE Spectrum, 2015, August, № 8, p. 44–49.
4. Jiang L., Wang C., Huang Y., Pei Z., Xin S., Wang W., Ma S., Brown T. Growth in Wind and Sun // IEEE Power & Energy. 2015. V. 13. № 6. P. 40–50.
5. Баринов В.А. Развитие Электроэнергетики и единой национальной электрической сети России (долгосрочная перспектива) // Энергия единой сети №2 (31) апрель - май 2017 г.
6. Переслыцких О.О., Рыбаченко И.В., Беляев А.Н. Повышение устойчивости сверхдальних линий электропередачи переменного тока с управляемой поперечной компенсацией // Материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции "Электроэнергетика глазами молодежи", том 1, 1–5 октября 2018 г., Казань, С.318-322.
7. Кашин И.В., Смоловик С.В. Устойчивость работы протяженных электропередач переменного тока с регулируемым устройством поперечной компенсации // Электричество. 2001. № 2., С.10-15.

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ДАЛЬНИХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С
УСТРОЙСТВАМИ ПРОДОЛЬНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ

Высокая стоимость линий электропередачи заставляет полностью использовать их пропускную способность, возлагая решение задачи обеспечения устойчивости на вспомогательные силовые устройства, обеспечивающие ее заданные или допустимые показатели [1]. Для ее повышения на достаточно протяженных высоковольтных линиях переменного тока могут применяться [2] устройства продольной емкостной компенсации (УПК).

В качестве объекта исследования рассмотрим электропередачу Итайпу – Сан-Паулу, поскольку она является наиболее характерным примером использования устройств продольной компенсации, а также УШР, которые предлагается установить взамен уже существующих нерегулируемых реакторов (линейных и шинных). Данная электропередача (рис. 1) содержит 3 трехцепных ВЛ класса напряжения 765 кВ, с одной стороны она присоединена к ГЭС Итайпу, а другой конец соединен с остальной частью бразильской энергосистемы.

Суммарная степень продольной компенсации составляет 49%. При малой нагрузке передачи во 2, 3 и 5-м узлах наблюдается повышение напряжения сверх допустимого. Результаты расчетов напряжений в узлах при различной нагрузке электропередачи приведены в табл. 1. Из полученных результатов рассмотрения режима напряжений при отключении линейных и шинных реакторов в узлах 3 и 5, получаем, что отключение шинного или линейных реакторов приводит к сильному повышению напряжений в узлах 2 и 5.

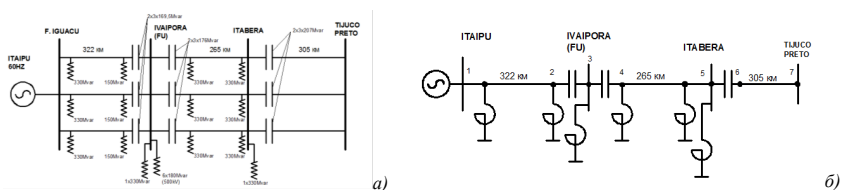


Рис. 1. Электропередача 765 кВ Итайпу – Сан-Паулу в Бразилии (а) и её упрощенная расчетная схема (б)

Таблица 1. Уровни напряжений на промежуточных подстанциях электропередачи при различной нагрузке линии

Номер	P=9000 МВт	P=7380 МВт	P=3000 МВт	P=672 МВт	P=66 МВт
1	765,00	765,00	765,00	765,00	765,00
2	774,67	791,02	812,42	814,01	813,43
3	754,59	775,87	806,52	811,48	811,65
4	767,04	778,41	797,24	802,12	802,88
5	762,11	781,25	809,02	813,61	813,79
6	736,71	758,62	793,16	801,18	802,25
7	765,00	765,00	765,00	765,00	765,00
угол на передаче	54,18	44,98	23,42	12,74	9,97

Попробуем подключить в узел 3 шинные реакторы, которые установлены на стороне 500 кВ. Использование шинных реакторов на стороне 500 кВ очень хорошо помогает поддерживать напряжения в узлах на заданном уровне при передаче мощности, близкой к натуральной. Однако, при малой нагрузке (холостой ход), в 5-м узле даже при наличии этих реакторов наблюдается небольшое повышение напряжения. коммутация линейных и шинных реакторов в различных узлах приводит к еще большему повышению в этом узле, а также в 6-м. Обеспечение режимов малых нагрузок (в том числе холостого хода) должно осуществляться за счет регулирования (понижения) напряжения генераторов. Таким образом, необходимо держать включенными реакторы на стороне 500 кВ все время. Коммутация любого реактора, даже при передаче мощности, близкой к натуральной, может привести к повышению напряжения сверх допустимого в некоторых узлах, если шинные реакторы на стороне 500 кВ отключены.

Рассмотрим вариант применения регулируемых средств компенсации реактивной мощности (табл. 2). Видно, что установка УШР в узлах 2 и 4 позволяет улучшить уровни напряжений в узлах. Положительный эффект от внедрения УШР можно наблюдать при малой нагрузке линий, так как при неуправляемых реакторах напряжения во 2, 3 и 5-м узлах повышается более, чем на 5% от номинального.

Управляемые шунтирующие реакторы позволяют поддерживать напряжение в этих узлах на заданном уровне. Однако, при этом необходимо увеличить мощность реакторов в этих узлах на 1213 МВар. Подключение шинных реакторов на стороне 500 кВ позволяет сильно снизить мощность УШР. Теперь для обеспечения напряжений в узлах необходимо увеличить мощность управляемых реакторов по сравнению с неуправляемыми всего на 344,8 МВА.

Регулирование уставок по напряжению реакторов позволяет изменять суммарную мощность УШР [3]. Повышая уставку реактора, установленного во втором узле, и понижая уставку по напряжению реактора в 4-м узле, можно снизить суммарную потребляемую мощность реакторов на 213,8 МВар при включенных реакторах на стороне 500 кВ (на 450,1 МВар при отключенных реакторах на стороне 500 кВ) в режиме холостого хода.

Таблица. 2. Напряжения при установке УШР в узлы 2 и 4 и при управлении реакторов (реакторы на стороне 500 кВ отключены)

Номер	P=9000 МВт	P=7380 МВт	P=3000 МВт	P=672 МВт	P=66 МВт
1	765,00	765,00	765,00	765,00	765,00
2	780,00 (Qp=619,9)	780,00 (Qp=756,1)	784,00 (Qp=984)	782,00 (Qp=1016)	782,00 (Qp=1086)
3	755,41	763,55	779,83	780,26	781,33
4	763,00 (Qp=774)	766,00 (Qp=1154,3)	773,00 (Qp=1528,8)	772,00 (Qp=1563)	774,00 (Qp=1567)
5	760,15	775,83	799,65	802,23	802,90
6	733,14	748,31	774,29	778,03	780,08
7	765,00	765,00	765,00	765,00	765,00
угол на передаче	54,27	45,27	23,63	12,82	10

Произведем расчет напряжений в узлах при отключении цепи второй линии (соответственно, отключены линейные реакторы в узлах, ограничивающих этот участок). Во всех узлах установлены неуправляемые ШР, при этом включены шинные реакторы на стороне 500 кВ. При отключении одной цепи второй линии наблюдается небольшое повышение напряжения сверх допустимого в узле 5. При передаче больших мощностей (9000 МВА), рекомендуется отключать шинные реакторы на стороне 500 кВ, чтобы избежать сильного снижения напряжения в узлах. С применением УШР в узлах 2 и 4 выполним

исследование режима напряжений электропередачи при отключении одной цепи второй линии, при этом шинные реакторы на стороне 500 кВ включены. Отключение одной цепи ведет к снижению пропускной способности линий, а также приводит к отключению линейных реакторов. Однако при этом увеличивается емкостное сопротивление УПК, а, следовательно, и мощность, генерируемая ей при большой нагрузке передачи [4].

Сравнения результатов расчетов установившихся режимов передачи при включенных шинных реакторах на стороне 500 кВ показывают следующее:

- при использовании УШР потребление реакторами реактивной мощности в случае отключения цепи второй линии на холостом ходу меньше на 379 МВар по сравнению с результатами, полученными для полной схемы;
- замена неуправляемых шунтирующих реакторов на УШР на протяженной электропередаче приводит к улучшению режима напряжений и допускает передачу мощности порядка $1,5P_{\text{нат}}$ двухцепной линии (3675 МВт) против проектной мощности 2450 МВт;
- для обоих вариантов схемы можно передать достаточно большое количество мощности;

Таким образом, проанализировав полученные результаты, можем сделать следующие выводы:

1) Значительная реактивная мощность, генерируемая емкостью при протекании рабочих токов, требует применения управляемых устройств поперечной компенсации. Находящиеся в эксплуатации УПК используют для этой цели только неуправляемые шунтирующие реакторы.

2) Выполнен анализ режимов работы одной из известных компенсированных электропередач с несколькими УПК. Показано, что возможность регулирования реактивной мощности при изменении загрузки линии и возможность управления уставками УШР по напряжению способствуют существенному увеличению их пропускной способности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Хазов М.А., Черняев П.В., Беляев А.Н. Исследование режимов и устойчивости межсистемной связи на основе гибкой линии электропередачи переменного тока с управляемой продольной и поперечной компенсацией// Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки 2017. Т. 23. № 4. С.74-88. DOI: 10.18721/JEST.230407.
2. Марченко Е.А., Розовский Ю.А. Шур С.С. Продольная емкостная компенсация линий электропередачи. М., Л.: ГЭИ, 1957, 48 с.
3. Беляев А.Н., Смоловик С.В. О быстрействии управляемых шунтирующих реакторов с точки зрения статической и динамической устойчивости электроэнергетических систем// Электрические станции. 2014. № 1. С.27-30.
4. Александров Г.Н. Передача электрической энергии. СПб: Изд-во Политех. ун-та, 2007, 411 с.

УДК 621.317.385

Д.Д. Деверилин¹, Д.А. Акимов²

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого; ²АО «ФИЦ»

ОЦЕНКА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МОДЕЛИ КОНЕЧНЫХ СОСТОЯНИЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ДЕЗАГРЕГАЦИИ СОВРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

Как показали многочисленные исследования, определение энергопрофиля потребителя позволяет ему осознанно подойти к вопросу энергосбережения и тем самым повысить собственную энергоэффективность. Кроме того, определение вида, времени и мощности включенных в течение суток устройств позволяет определить ресурс управляемой нагрузки для участия в программе управления спросом, запущенной в России для розничных

потребителей в 2019 г. Одним из наиболее эффективных и недорогих способов определения состава нагрузки является ее дезагрегация путем считывания и анализа данных приборов учета с разложением общего сигнала энергопотребления на составляющие. Данный алгоритм известен за рубежом, как Nonintrusive load monitoring (NILM). Это позволяет потребителю контролировать энергопотребление, используя только один индивидуальный прибор учета электроэнергии – нет необходимости в измерениях каждого из элементов нагрузки.

Метод NILM впервые был предложен Джорджем Хартом в [1], в которой рассматривается дезагрегация нагрузки на основе модели конечных состояний. Его исследование основывается на нескольких допущениях:

- в единичный момент времени происходит одно включение или выключение элемента нагрузки;

- работающее устройство потребляет постоянное количество электроэнергии.

Отсутствие в своей модели устройств с переменным во времени потреблением энергии объясняется их малораспространенностью во время проведения исследований.

Процесс переключения прибора может описываться логическим вектором, содержащим 1 столбец и n строк, где n это количество устройств:

$$a_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если прибор } i \text{ включен в момент времени } t \\ 0, & \text{если прибор } i \text{ выключен в момент времени } t \end{cases}$$

где $i \in [1; n]$. Таким образом можно описать полную мощность, как:

$$P(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t)P_i + e(t),$$

где P_i – мощность i -го прибора, $e(t)$ – поправка на погрешность измерений.

Точность алгоритма дезагрегации нагрузки на основе модели конечных состояний для электроприборов 1980-х годов составляет около 86% [1].

В данной работе рассмотрено практическое применение алгоритма Харта на современных наборах данных (датасетах), и произведена оценка возможности его использования в условиях современных электропотребляющих приборов.

В качестве рассматриваемых данных был использован датасет REDD [2]. Эти данные были получены путем измерения потребления электроэнергии как всего здания, так и отдельными электроприборами, для шести зданий США в апреле 2011 года с периодичностью измерения 1 секунда.

Для анализа и визуализации этих данных был использован язык программирования Python, интегрированная среда разработки Pycharm и инструментарий с открытым исходным кодом NILMTK [3]. Потребление электроприборов первого дома из датасета REDD в период с 20.04.2011 по 24.04.2011 представлено на рисунке 1.

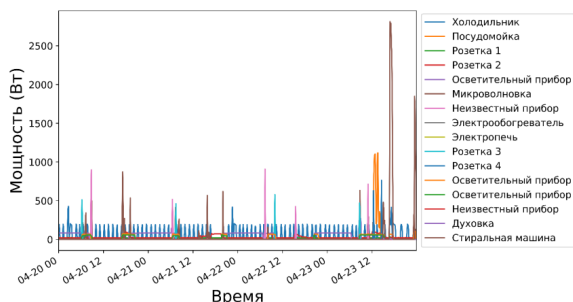


Рис. 1. График электропотребления первого дома датасета REDD

Таким образом, суммарное энергопотребление дома определяется 16 электроприборами. Однако, использование метода дезагрегации нагрузки на основе модели конечных состояний позволило выявить лишь 3 из них, причем с невысокой точностью – холодильник, стиральная машина, посудомойка. Реальный и полученный алгоритмом дезагрегации графики энергопотребления холодильника представлены на рисунке 2.

Как показал анализ полученных результатов, точность алгоритма на основе модели конечных состояний составила всего около 19% при применении к современным данным по энергопотреблению. Данное снижение точности (с 86% до 19%) объясняется появлением большего количества нагрузки с переменной величиной энергопотребления, а также большим числом возможных состояний. Кроме того, возросло число маломощных приборов, чью нагрузку сложно определить из-за погрешностей измерений, а также специфики алгоритма.

Таким образом, решение задачи дезагрегации современной нагрузки с использованием модели конечных состояний приводит к крайне низкой точности работы алгоритма из-за изменившегося характера энергопотребления. Требуется развитие более совершенных математических методов для решения данной задачи.

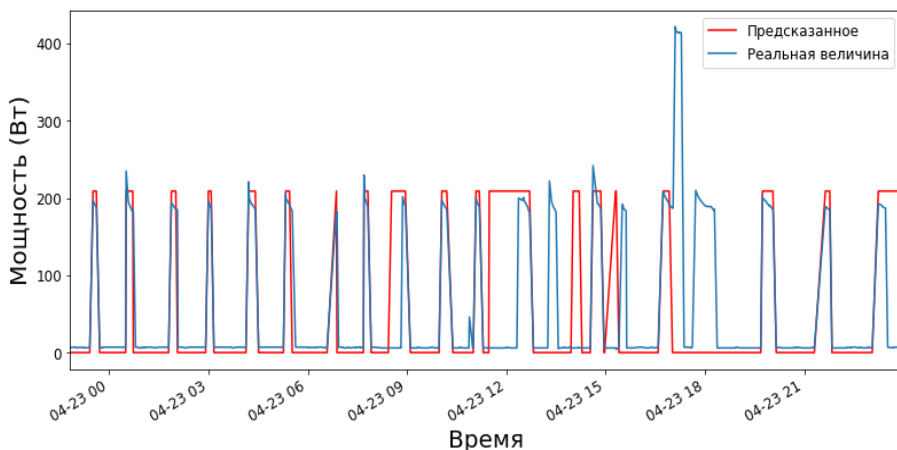


Рис. 2. Реальный и полученный алгоритмом дезагрегации графики энергопотребления холодильника первого дома датасета REDD

ЛИТЕРАТУРА:

1. Hart W.G. Nonintrusive appliance load monitoring / W.G. Hart // Proceedings of the IEEE. 1992. Vol.80, № 12. P.1870-1891.
2. Электронный ресурс. URL: <http://redd.csail.mit.edu/> (дата обращения 10.10.2019)
3. Электронный ресурс. URL: <http://nilmtk.github.io/#publications> (дата обращения 10.10.2019)

РЕКОНСТРУКЦИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ПУНКТОВ 6-20 КВ НА БАЗЕ РЕКЛОУЗЕРОВ

Существующий парк оборудования сетей 6 – 20 кВ не позволяет обеспечить требуемое увеличение присоединений потребителей без переконфигурирования всего сетевого комплекса. Одним из возможных решений является применение реклоузеров.

Являясь аппаратом управления и выполняя одновременно функции защиты присоединений, реклоузер практически не требует обслуживания. Шкаф управления реклоузера имеет систему самодиагностики и передаёт во внешнюю SCADA информацию о неисправностях в режиме реального времени. Переключения (изменение конфигурации сети) также осуществляется дистанционно [1].

Реклоузеры Таврида Электрик типа Rec15 в различных модификациях на базе вакуумных коммутационных модулей предназначены как для воздушных, так и кабельных сетей 6-20 кВ с любым режимом нейтрали (изолированная, заземленная, компенсированная) и установкой как на линию, так и в магистраль, как для автоматических пунктов секционирования, так и местного резервирования сети. Так, реклоузеры Rec15_R5, как правило, устанавливаются на отпайки и опционально могут комплектоваться с функцией коммерческого учета, а реклоузер Rec15_L5 применяются и в кольцевых сетях с несколькими источниками питания [2].

Так, при модернизации Валдайского РЭС помимо классических технических решений по автоматизации сетей был выполнено демонтажу РП Миронегги (рис. 1) с установкой реклоузеров Rec15.

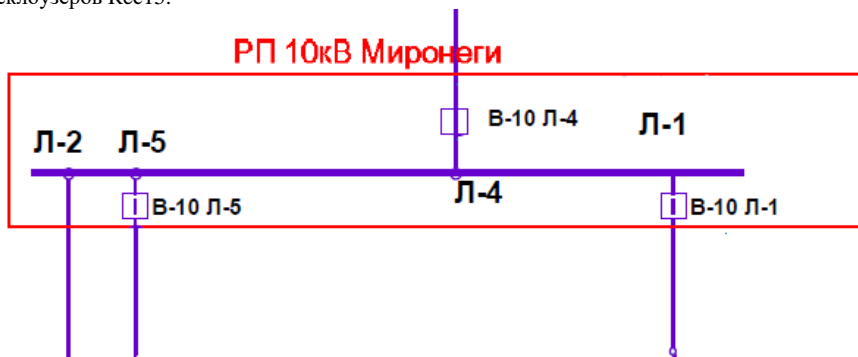


Рис.1. Исходная схема РП Миронегги

При повреждении любой из трех отходящих линий, коммутируемых выключателями нагрузки, отключались все потребители. Замена оборудования РП требовала бы значительных временных и материальных затрат и отключения потребителей на всё время проведения работ.

В этой связи было решено шунтировать РП реклоузерами (рис.2).

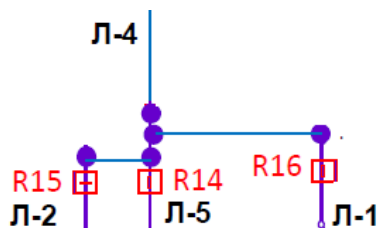


Рис.2. Шунтирование РП Миронегги реклоузерами (R16 - для секционирования Л-1 и Л-4, R14 – для секционирования Л-4 и Л-5 и R15 – для секционирования Л-2 и Л-4 с АВР)

Установка каждого реклоузера независима от установки остальных и занимает не более 3 часов, что значительно экономит время монтажных работ и не требует отключения всех потребителей. При повреждении на любой из отходящих линий она отключается соответствующим реклоузером селективно.

Для оценки эффекта от модернизации РП определяются следующие показатели [3]:

SAIFI - характеризует среднее число отключений одного потребителя за год.

SAIDI – характеризует, соответственно среднюю продолжительность отключения одного потребителя за год. Рассчитываются их значения ДО и ПОСЛЕ модернизации и проверяется достижение целевых показателей проекта с помощью предлагаемых решений.

Оценка показателей надежности ведется согласно методическим указаниям по расчету уровня надежности и качества поставляемых товаров и оказываемых услуг для организации по управлению единой национальной (общероссийской) электрической сетью и территориальных сетевых организаций (приказу Минэнерго России от 29.11.2016 N 1256).

Усреднение SAIFI за все время наблюдения

$$SAIFI_{\text{средн}} = \frac{SAIFI_1 + SAIFI_2 + SAIFI_i + \dots + SAIFI_N}{N} \quad (1)$$

где $SAIFI_i$ – среднее количество отключений потребителя за рассматриваемый год; N – количество лет, за которые имеются исходные данные.

Расчет SAIDI на каждый год, за который имеются данные:

Усреднение SAIDI за все время наблюдения

$$SAIDI_{\text{средн}} = \frac{SAIDI_1 + SAIDI_2 + SAIDI_i + \dots + SAIDI_N}{N} \quad (2)$$

где $SAIDI_i$ – среднее время перерыва электроснабжения потребителей за рассматриваемый год; N – количество лет, за которые имеются исходные данные.

На основании проведенных с помощью специализированного программного обеспечения расчетов были получены следующие показатели надежности (см. табл.1):

Таблица 1. Показатели надежности.

	Длина, км	Кол-во потребителей	SAIFI, откл./год	SAIDI, час/год	SAIDI*P, кВт*час/год
До реконструкции	128,95	90	1,67	7,81	16795
После реконструкции	128,95	90	1,09	4,96	9688

Таким образом:

- существенно (на 33%) уменьшается число отключений, а их продолжительность сокращается на 36%, поскольку секционирование линий реклоузерами позволяет локализовать аварийный участок и обеспечивается селективность работы средств релейной защиты и автоматики,
- повышается гибкость управления конфигурацией сети за счет использования интеллектуальных коммутационных аппаратов и возможности мониторинга режимных параметров по участкам сети и сокращается потребность выездов ремонтных бригад за счет дистанционного управления реклоузерами.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Таврида Электрик. (2019). TER_RecDoc_PG_1 Техническая информация. Санкт-Петербург
2. Таврида Таврида Электрик. (2019). TER_RecDoc_MR_1_Rec15 по проектированию. Санкт-Петербург.
3. Chowdhury A., Koval D. Power distribution system reliability: practical methods and applications. – John Wiley & Sons, 2011. – Т. 48.

УДК 621.3.08

А.Д. Разинкова, А.Н. Беляев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМ СМПР ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАБЛЮДАЕМОСТИ И УПРАВЛЯЕМОСТИ КРУПНЫХ ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЙ

В настоящее время развитие электроэнергетики идет в направлении интеллектуализации ЭЭС (электроэнергетической системы), что обуславливает внедрение системы мониторинга переходных режимов [1] (СМПР, англ. WAMS или wide area measurement system) – технология, разработанная для повышения устойчивости энергосистемы, которая обеспечивает распределенную структуру управления сильно взаимосвязанной энергосистемой. Система мониторинга переходных режимов использует технологию синхронизированной векторной регистрации параметров электрического режима и векторные измерения (PMU – phasor measurement unit) и реализуется как подсистема информационного обеспечения управления режимами ЭЭС [2].

С созданием СМПР появилась возможность получать более детальную информацию о параметрах установившихся и главным образом переходных режимов ЭЭС/ОЭС, возникающих вследствие технологических нарушений или аварий [2]. Изучение этой информации дает новые сведения о динамических свойствах системы, позволяет совершенствовать расчетные модели, решать другие задачи по повышению качества и надежности управления режимами. Система мониторинга переходных режимов стала необходимостью модернизации системы электроснабжения после возникновения крупных отключений в энергосистемах по всему миру.

Рассматриваемая технология представляет собой совокупность регистраторов, концентраторов векторных данных, каналов передачи информации между регистраторами, концентраторами данных и диспетчерскими центрами ОАО «СО ЕЭС», а также средств обработки полученной информации [3]. Синхронизация измерений СМПР в различных узлах крупных систем с целью получения фазовых сдвигов измеряемых сигналов осуществляется при помощи глобальных навигационных спутниковых систем GPS/ГЛОНАСС [3]. Прием сигналов от GPS ведется сервером времени, предназначенным для формирования сигналов точного времени и дальнейшей синхронизации устройств. Здесь важным является точность в

одновременности момента измерений, чтобы передаваемая с величинами измерений метка времени в различных точках была максимально синхронизирована для всех измерений.

Одним из реализованных примеров применения данных СМРР в регулировании является Тихоокеанская электропередача постоянного тока (англ., Pacific DC Intertie или PDCI). Проект данной ЛЭП запущен летом 2013 года. Были осуществлены следующие действия: сборка, установка и демонстрация демпфирующего контроллера в режиме реального времени. Так же присутствовал контроль сигналов, основанный на территории, расположенной между двумя синими пунктами, РМУ обратной связи (рис.1, а) [4]. Было проведено тестирование по замкнутому циклу в сети западной части Северной Америки с использованием PDCI.

На рис. 1, б) [4] представлена упрощенная схема дополнительной системы регулирования тихоокеанской линии электропередачи (PDCI). Датчики РМУ измеряют вектора напряжений в северной и южной частях энергообъединения, далее выдается разница частоты колебаний по концам электропередачи и формируется управляющее воздействие на изменение передаваемой по линии мощности. Задержки на измерение, передачу, преобразование и синхронизацию сигналов по времени представлены на рис. 1, в) [4]. Видно, что суммарная постоянная времени этой системы равна 0,082 сек. Это говорит о достаточно высоком быстродействии.

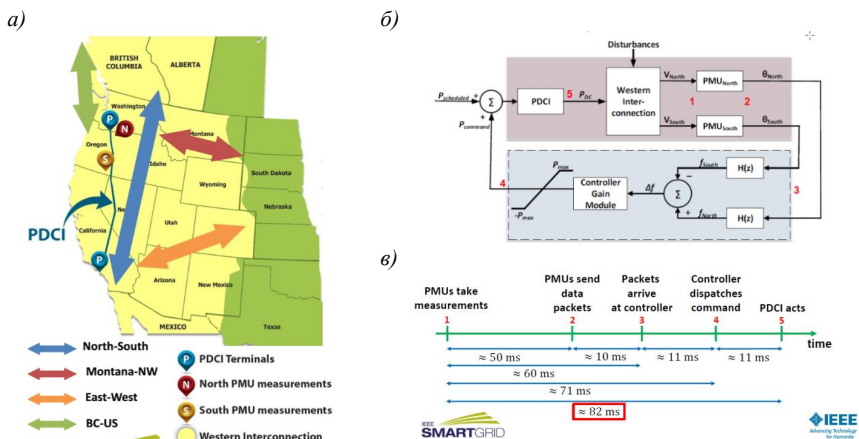


Рис. 1. Тихоокеанская электропередача постоянного тока PDCI (а), схема демпфирующего контроллера (б) и оценка его быстродействия (в)

Рассмотрим простейшую модель межсистемной электропередачи, представленную на рис. 2.

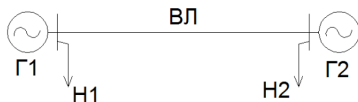


Рис. 2. Расчетная схема двухмашинной ЭЭС

Определим влияние обратной связи по взаимным параметрам на динамическую устойчивость данной системы. Рассчитаем предельное время отключения трехфазного короткого замыкания на шинах станции (табл. 1). Видно, что уровень динамической

устойчивости ЭЭС без регулирования по взаимным параметрам достаточно низкий. Рассмотрим внедрение дополнительных обратных связей по взаимному углу на передаче системы АРЧМ обоих генераторов. Наиболее существенный эффект вносит управление на генераторе Г1, однако для достижения оптимальных условий работы оборудования целесообразно одновременное использование управления по взаимным параметрам на генераторах Г1 и Г2. Для улучшения качества демпфирования колебаний введем обратную связь по отклонению угла и в АРВ.

Рассчитаем предельное время отключения трехфазного кз при наличии управления по взаимным параметрам. Из нижней строки табл. 1 видно, что введение такого управления на двух станциях нашей системы увеличивает предельное время отключения трехфазного короткого замыкания на шинах станций практически в два раза.

Рассмотрим поведение кривых механических моментов турбины генераторов Г1 и Г2 при трехфазном кз на шинах Г1 продолжительностью 0,159 с совместно со взаимным углом между роторами данных генераторов (рис. 3).

Таблица 1. Предельное время отключения короткого замыкания

	Место короткого замыкания	
	Г1	Г2
$\Delta t_{кз}$ (без регулирования), с	0,080	0,133
$\Delta t_{кз}$ (с регулированием), с	0,159	0,211

Введение одновременного регулирования на двух станциях существенно уменьшает продолжительность разгрузки турбины генератора Г1 (почти в 2 раза). При этом происходит увеличение до предельного значения момента турбины генератора Г2 на 1 с, что требует резерва мощности приемной части системы. Поэтому выбор места управления зависит от нахождения баланса между приемлемыми режимами работы оборудования станции и уровнем динамической устойчивости. По истечении 7 с после аварийного возмущения система возвращается в исходный режим, что свидетельствует о высоком качестве демпфирования колебаний.

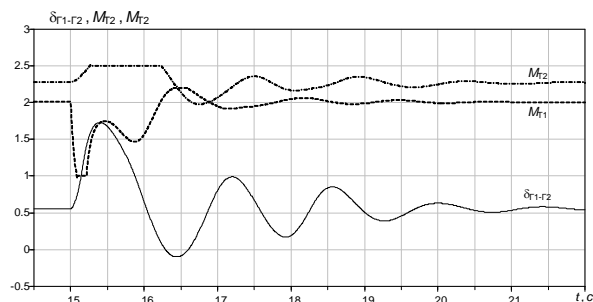


Рис. 3. Кривые механического момента турбины Г1 (---) и Г2 (- . - . -) и взаимного угла (—)

Выводы: На основе расчетов динамической устойчивости упрощенного эквивалента межсистемной линии электропередачи обоснована необходимость применения систем регулирования по взаимным параметрам, учитывая данные мониторинга переходных режимов (WAMS/СМПП). Максимальные показатели статической устойчивости могут быть

получены только регулированием по традиционным местным параметрам (напряжение, частота и их производные) без применения данных СМПП. Однако внедрение дополнительного регулирования по взаимным параметрам позволяет повысить уровень динамической устойчивости в 2 раза.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Колосок И.Н., Гурина Л.А., Достоверизация данных синхронизированных векторных измерений при кибератаках на СМПП// Информационные и математические технологии в науке и управлении – 2017. - №1(5). – с. 19-29.
2. Андрей Жуков, Юрий Куликов, Анатолий Демчук, Иван Мацкевич., Система мониторинга переходных режимов – 2010. - №2. – с.52-57.
3. Дмитрий Дубинин, Андрей Жуков, Развитие технологии синхронизированных векторных измерений в ЕЭС России//Цифровая подстанция – URL: <http://digitalsubstation.com/blog/2018/03/22/razvitie-tehnologii-sinhronizirovannyh-vektornyh-izmerenij-v-nbsp-ees-rossii/>. – (дата обращения: 09.10.2019).
4. David A. Copp, Ph.D. Sandia National Laboratories, «Distributed Control for Improvin Power System Stability», April 12, 2018.

УДК 621.313.322

А.С. Родионова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ РАБОТЫ И УСТОЙЧИВОСТИ СВЕРХДЛИННЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ С УПРАВЛЯЕМОЙ ШУНТИРУЮЩЕЙ КОМПЕНСАЦИЕЙ

По мере увеличения длины линий электропередачи и объединения энергетических систем возникают проблемы с реализацией режимов передачи мощностей, как по условию устойчивой работы, так и из-за недопустимого повышения напряжения в промежуточных точках линии.

Как известно, на передачах постоянного тока не требуется установка устройств компенсации реактивной мощности на линиях. Однако для обеспечения преобразования из переменного тока в постоянный и обратно с обеих сторон необходимы регулируемые источники реактивной мощности. Кроме того, затраты на установку и обслуживание преобразовательных устройств оказываются сравнимыми с затратами на сооружение линий.

Основной целью работы является исследование применения управляемых устройств поперечной компенсации реактивной мощности для улучшения характеристик установившихся режимов и повышения уровня статической и динамической устойчивости сверхдлинных линий электропередачи переменного тока (2000-4000 км).

За последние годы достигнут значительный прогресс в разработке и практическом осуществлении различных конструкций управляемых шунтирующих реакторов (УШР) [1]. В связи с этим представляет интерес возможность их использования на дальних линиях электропередачи длиной свыше 1500 км, где статическая устойчивость рабочих режимов не может быть обеспечена без средств компенсации.

В работе [2] также было проведено компьютерное моделирование при использовании полных уравнений Парка-Горева для линии с натуральной мощностью 7400 МВт. При этом было обнаружено, что предельный режим наступал при углах, чуть меньших 180 эл. град. Было определено, что при длинах менее 2400 км, статическая устойчивость сохраняется во всех режимах вплоть до натурального, а при увеличении длины предельная передаваемая мощность ниже натуральной, и это выражается тем сильнее, чем длиннее линия.

Для увеличения предельной передаваемой мощности и улучшения статической устойчивости было предложено использование синхронного компенсатора (СК) небольшой мощности в дополнение к УШР [3]. В данной работе рассматривалась такая же линия, как и в [2] при разбиении ее на четное количество участков и установкой в центральную точку синхронного компенсатора. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Как видно из табл. 1, при длине линии 3600 км предельно допустимая мощность равна 0.91 о.е., что существенно выше результата для линии такой же длины, представленного в [2]. При дальнейшем увеличении длины линии предельно допустимая мощность уменьшается, достигая всего 0.78 о.е. при длине 4600 км. Однако установка не одного, а нескольких синхронных компенсаторов приводит к дополнительному увеличению мощности до 0.92 о.е.

Таблица 1. Пределы передаваемой мощности электропередачи с УШР и СК в зависимости от длины линии

Длина линии, км и число участков	Предельные режимы для линии	
	$P_{пр}$	$\delta_{пр}$ $\delta_{пр}(\delta_{лин}), \text{град}$
3400; 6	0.93	232.08 (176.98)
3800; 8	0.88	240.91 (187.31)
4000; 8	0.87	247.02 (193.73)
4200; 8	0.85	250.0 (197.47)
4400; 8	0.8	244.26 (193.28)
4600; 8	0.78	245.81 (195.56)
4400; 8 (при установке трех СК равномерно вдоль линии)	0.92	276.45 (221.64)

Отсюда видно, что совместное применение синхронных компенсаторов ограниченной мощности и мощных управляемых шунтирующих реакторов позволяет снять какие-либо ограничения на длину линии переменного тока. При этом стоит отметить, что выполнение схемы с параллельной работой двух управляемых компенсирующих устройств СК и УШР имеет ряд преимуществ. Во-первых, оба устройства являются стандартными, при сравнительно малой стоимости установки и номинальной мощности СК, а их совместная работа позволяет не только сохранить достоинства каждого элемента в отдельности, но и частично устранить их недостатки. Во-вторых, подобное решение позволяет существенно расширить диапазон возможных режимов дальних электропередач переменного тока и сделать управление их режимами более гибким.

В табл. 2 показаны результаты расчетов предельных передаваемых мощностей при оптимизации значений коэффициентов УШР и АРВ СК для обеспечения статической устойчивости и требуемого демпфирования колебаний. Под унификацией настроек понимается возможность не менять коэффициенты регулирования в широком диапазоне режимов работы.

Таблица 2. Предельные мощности передачи при различных сигналах стабилизации

Сигнал стабилизации	$P_{пред}, \text{МВт}$ $T = 0.1 \text{ с}$	$P_{пред}, \text{МВт}$ $T = 0.3 \text{ с}$	Унификация настроек
U'	5700	5700 ($\delta=169^\circ$)	Да
I, I'	6050	6600 ($\delta=194^\circ$)	Нет
P, P'	6000	6050 ($\delta=177^\circ$)	Нет

В работе [4] также было определено, что установка в промежуточных точках схемы синхронных компенсаторов, позволяет увеличить предел передаваемой мощности вплоть до

натуральной для длин линий больше 3000-3500 км. На рис. 1, а показано изменение предельной мощности при различных способах включения СК, а на рис. 1, б – предельная передаваемая мощность при включении СК в центре линии. Видно, что даже при включении одного СК в центре линии, предельную мощность удается поднять почти до натуральной. Стоит отметить, что при исследовании использовался метод оптимизации на базе численного поиска, также описанный в [4].

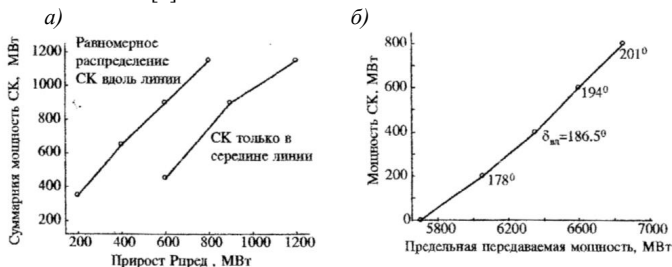


Рис. 1. Увеличение $P_{\text{пред}}$ для различных способов включения СК (а) $P_{\text{пред}}$ при включении СК в середине линии

Увеличим количество синхронных компенсаторов до трех, установив их в точках 3, 5 и 7. Результаты оптимизации параметров регуляторов представлены в табл. 3. Предел передаваемой мощности увеличился до 1,08 о.е., то есть увеличение составило чуть более 5%. Можно показать, что при возникновении переходного процесса, связанного с малым набросом мощности на турбину (0,005 о.е.), устойчивость системы сохраняется.

Таблица 3. Оптимальные настройки систем управления при передаче мощности $P = 1,08$ о.е. с тремя синхронными компенсаторами

P , о.е.	V , о.е.	δ , град.	Корни хар-го полинома	Коэффициенты регулирования СК
1.08	0	242.3	$-3.8037 \pm j18.782$	$K_{SC3_{0u}} = -6.439$ $K_{SC3_{1u}} = -8.727$
	0.075		-3.3619	$K_{SC3_{0f}} = 1.695$ $K_{SC3_{1f}} = -1.661$
	0.062		$-3.015 \pm j0.4241$	$K_{SC5_{0u}} = -14.556$ $K_{SC5_{1u}} = -0.636$
	0.0488		$-2.9933 \pm j0.9625$	$K_{SC5_{0f}} = 4.709$ $K_{SC5_{1f}} = 1.545$
	0.0364		-1	$K_{SC7_{0u}} = -6.877$ $K_{SC7_{1u}} = -4.125$
	0.0247		-0.8432	$K_{SC7_{0f}} = 4.167$ $K_{SC7_{1f}} = -0.418$
	0.0152		-0.8432	
	0		-0.2299	

Установка дополнительных синхронных компенсаторов в различных точках линии увеличивает, хотя и незначительно, предел передаваемой мощности. Проанализируем изменение предела передаваемой мощности для всех трех случаев при двукратном увеличении установленной мощности СК.

Таблица 4. Пределы передаваемой мощности при различной мощности и местах установки СК

Места установки СК	Мощность СК в узле, МВА	
	360	720
	Предельная мощность, о.е.	
5	1.02	1.06
4 и 7	1.04	1.11
3, 5 и 7	1.08	1.21

Результаты представлены в табл. 4. Из нее видно, что при удвоении мощности компенсатора предельная мощность линии с тремя СК увеличивается до 1,21 о.е. Таким образом, при данной конфигурации схемы установленный запас статической устойчивости позволяет работать в диапазоне режимов передачи от холостого до натуральной мощности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Брянцев А.М., Долгополов А.Г., Евдокунин Г.А., Липатов Ю.А., Лурье А.И., Маклецова Е.Е. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сети 35-500 кВ // Электротехника. 2003. № 1.
2. Рагозин А.А. Условия статической устойчивости дальних линий электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами и их физическая интерпретация. // Электричество, 1997, №5, стр. 11-14.
3. Кашин И.В., Смоловик С.В. Устойчивость работы протяженных электропередач переменного тока с регулируемым устройствами поперечной компенсации // Электричество. 2001. № 2., С.10-15.
4. Масленников В.А., Устинов С.М. Статическая устойчивость протяженных электропередач с управляемыми шунтирующими реакторами // Известия РАН. Энергетика, 1995, № 1. С.58-65.

УДК 621.31(06)

М.Н. Тимофеев, С.Я. Пичхидзе

Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

ХАРАКТЕРИСТИКА ЭНЕРГОСИСТЕМЫ САРАТОВСКОЙ ОБЛАСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

Саратовская энергосистема входит в Объединенную энергосистему Средней Волги и граничит с Ульяновской, Самарской, Волгоградской, Воронежской, Пензенской энергосистемами и энергосистемой Республики Казахстан. Суммарная установленная мощность электростанций Саратовской энергосистемы по состоянию на 1 января 2018 года составляет 6627,0 МВт (табл. 1) [1].

Целью работы является использование системного подхода для выбора оптимальной структуры энергосистемы. В работе использовались методы расчёта, рекомендованные нормативными документами и существующими методиками [2 – 4]. Для оценки ветроэнергетического потенциала были использованы следующие данные: среднегодовая и среднемесячная скорость ветра, амплитуда суточного хода скорости ветра по кварталам, градуированная повторяемость скорости ветра по градациям, вертикальный профиль средней скорости ветра, плотность воздуха, интенсивность турбулентности ветрового потока. Для оценки солнечного потенциала использовались базы данных спутниковых наблюдений, результаты расчета дублировались в программе «PVsyst» с использованием базы «Meteonorm 7.2». Технические характеристики ветротурбин и солнечных панелей для моделирования были получены с баз данных официальных сайтов производителей.

Таблица 1. Установленная электрическая мощность Саратовской области

Наименование	Установленная мощность на 1 января 2019 года (МВт)
"Балаковская атомная станция"	4000,00
Саратовская ГЭС	1415,00
ТЭС	1137,00
Фотоэлектрические солнечные электростанции	45,00
Всего:	6646,00

На основании результатов наблюдений по среднемесячной скорости ветра в заданное время по Гринвичу, была составлена математическая модель и построено графическое выражение полученных данных. Так как в течение суток ветер дует неравномерно, имеющиеся данные были систематизированы и далее рассчитывалась вероятность заданной скорости ветра для ветротурбин фирмы Vestas V112-3MW и V100-1,8MW (табл. 2).

В результате обработки метеоданных длительности светового дня, времени восхода и заката, есть возможность спрогнозировать продолжительность светового дня в будущем, а также оценить, какое количество энергии будет выработано в данный день или до необходимого момента времени. Имея данные по продолжительности светового дня, частоте ясных дней, проценте облачности, была рассчитана теоретическая производительность солнечных батарей по месяцам (табл. 3).

Для определения рабочих режимов одновременной работы двух источников ветровой и солнечной энергии, было произведено моделирование на основании данных по восходам и закатам и среднемесячной скорости ветра в заданное время по Гринвичу.

Таблица 2. Выработка электроэнергии турбиной марки Vestas на высоте 100 м

Производительность по месяцам ветротурбиной (кВт)												Год	Марка ветротурбины
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII		
1000,2	1130,4	1119,2	1169,2	1080,4	972,2	922,2	1016,6	1099,8	1194,2	1002,8	955,8	12663	V112-3MW
815,3	885,7	873,9	907,5	852,1	785,8	752,2	813,5	863	924,3	808,5	787,6	10069,4	V100-1,8MW

Таблица 3. Моделирование выработки электроэнергии солнечными батареями

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Производительность фотопанели (кВт/час)													
CS 6 K-2 752 8 5M	6,9337	13,5756	19,71	22,056	24,8	24,5	24,76	23,95	20,37088	14,449	7,8496	5,96017	17,44
SW 350 XL MON O	8,5786	16,7963	24,39	27,288	30,6	30,31	30,63	29,63	25,20366	17,877	9,7119	7,37417	21,577

В результате составлена математическая модель, решаемая методами линейного программирования:

$$\begin{cases} a_л x + b_л y \leq d_л & d_л \rightarrow 0 \\ a_з x + b_з y \leq d_з & d_з \rightarrow 0 \\ c_л x + c_{вл} y \geq e & e \rightarrow +\infty \\ c_з x + c_{вз} y \geq e & s \rightarrow 0 \\ p_w x + p_s y \leq s \end{cases}$$

где:

$a_л$ – производительность одной солнечной батареи, в день летнего солнцестояния, кВт/ч;

$b_л$ – производительность одной ветроэнергетической установки, в день летнего солнцестояния, кВт/ч;

$c_л$ – продолжительность летнего дня, ч;

$c_{вл}$ – время работы ветроэнергетических установок в летний период, ч;

$d_л$ – потребность в производстве электроэнергии в летний период, кВт;

$a_з$ – производительность одной солнечной батареи, в день зимнего солнцестояния, кВт/ч;

$b_з$ – производительность одной ветроэнергетической установки, в день зимнего солнцестояния, кВт/ч;

$c_з$ – продолжительность зимнего дня, ч;

$c_{вз}$ – время работы ветроэнергетических установок, зимой, ч;

$d_з$ – потребность в производстве электроэнергии в зимний период, кВт;

p_w – стоимость одной ветротурбины, тыс.руб.;

p_s – стоимость одной солнечной панели, тыс.руб.;

e – время работы гибридной электростанции, ч;

s – общая стоимость оборудования, заложенная в бюджете проекта, тыс.руб.;

x – общая площадь установленных фотоэлементов, м²;

y – количество установленных ветроэнергетических установок, ед.

Решение системы неравенств позволяет определить, какое количество ветротурбин и какое количество солнечных батарей или солнечных коллекторов необходимо установить для удовлетворения потребности в электроэнергии заданного объекта.

В условиях континентального климата Саратовской области целесообразно использовать гибридные электростанции, использующие солнечный и ветряной источник энергии. Создание интеллектуальной электрической сети, включающей два возобновляемых источника электроэнергии, позволит выполнять не только имеющиеся договорные обязательства, но и участвовать в работе оптового рынка электроэнергии и мощности России.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Постановление Губернатора Саратовской области от 30 апреля 2019 г. N 93 "О схеме и программе перспективного развития электроэнергетики Саратовской области на 2020-2024 годы" [Электронный ресурс] / "Новости Саратовской губернии", — Электрон. текстовые дан. — Саратов.:2019. – Режим доступа: <http://g-64.ru/openoff.php?id=080520193431>, свободный.
2. Тимофеев М. Н. Построение модели природной среды для проектирования электроэнергетических систем с возобновляемыми источниками электроэнергии //Электротехнические комплексы и системы управления. – 2015. – №. 4. – С. 29-33.
3. Тимофеев М.Н. Пути реализации интеллектуальных сетей («smart grid») в Саратовской области / М.Н. Тимофеев, Ю.Б. Томашевский // Анализ, синтез и управление в сложных системах /Сб. науч. тр. Сарат. гос. техн. ун-т. Саратов, 2011. С.98-103.
4. Тимофеев М.Н. Использование системного подхода для выбора структуры гибридной электростанции на примере Саратовской области / М.Н. Тимофеев, А.Н. Тимофеев //XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. 2018. №4 С. 61-66.

ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОНДЕНСАТОРНЫХ БАТАРЕЙ ДЛЯ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ УСТАНОВКАМИ

Введение. Одной из главных проблем промышленности в наше время является проблема экономного использования всех типов энергии, электрической в том числе. Соответственно, повышение экономичности работы электроустановок является актуальной задачей.

На сегодняшний день электроэнергия давно стала повсеместным продуктом использования, наделенным своими характеристиками, главная из которых – качество электроэнергии. За последние 10 лет улучшение качества электроэнергии является целью номер один, ведь именно оно существенно влияет на надежность энергосистем и технологическое развитие в целом. Вопросы улучшения качества электроэнергии требуют серьезного анализа и понимания происходящих при этом явлений [1].

Актуальность. Один из наиболее важных вопросов, связанных с повышением качества электроэнергии в сетях, учитывающийся на всех стадиях эксплуатации и проектирования систем электроснабжения (СЭ), – это вопрос о компенсации реактивной мощности, состоящий из выбора целесообразных источников компенсации, расчета их мощности, а также размещения источников в системе электроснабжения. Ведь именно вынужденная передача реактивной мощности является одной из главных причин возникновения дополнительных потерь в электрических сетях, а также приводит к повышению расходов на электроэнергию и увеличению нагрузки на все используемое электрическое оборудование.

Проблема компенсации реактивной мощности в электрических системах имеет огромное значение для страны, в частности из-за того, что в городских, сельских и промышленных электрических сетях увеличилось потребление реактивной мощности.

Одно из решений проблемы компенсации реактивной мощности – использование конденсаторных батарей [2]. На данный момент – это наиболее экономичное и распространённое средство. Это объясняется его весомыми преимуществами над другими средствами компенсации реактивной мощности, а именно: возможность использования как на высоком, так и на низком напряжении, малые потери активной мощности, легкость в установке и эксплуатации. Но даже при использовании таких, на первый взгляд универсальных установок, возникают трудности при использовании в сетях с повышенным содержанием высших гармоник. Исследование работы конденсаторных батарей в таких сетях представляет огромную важность (рис. 1).

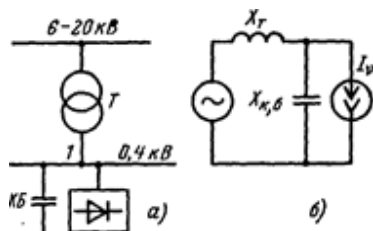


Рис. 1. Схема подключения конденсаторной батареи к преобразовательному трансформатору (а), схема замещения (б) [3]

Практика работы промышленных предприятий указывает на то, что батареи конденсаторов (БК), используемые при напряжении, отличном от синусоидального, в большинстве случаев выходят из строя. Это происходит в результате перегрузки токами высших гармоник, которая, в свою очередь, возникает из-за того, что конденсаторные батареи меняют частотные характеристики систем и способствуют созданию резонанса токов (рис. 2). При подсоединении батареи конденсаторов к подстанции, снабжающей мощную вентильную нагрузку, при любом значении емкости батареи, всегда будет присутствовать такая группа гармоник, при которых конденсаторы вступают в резонанс токов с индуктивностью сети. Токи резонирующей группы гармоник, создаваемые преобразователем в сети, сильно уменьшаются [4]. Одновременно с этим, емкостное сопротивление БК понижается с ростом числа номера гармоники. Это приводит к тому, что через батареи конденсаторов проходят большие токи резонансных гармоник, превышающие ток первой гармоники. В свою очередь конденсаторы допускают перегрузку по току до 25%, по напряжению до 10%. В реальной жизни из-за явления резонанса перегрузка по току может достигать 600%, так как токи резонансных гармоник могут быть намного больше тока первой гармоники.

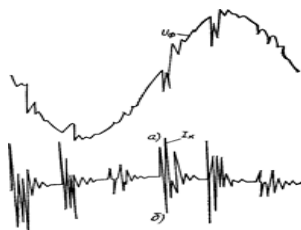


Рис. 2. Осциллограммы, полученные на физической модели (рис. 1): фазного напряжения в точке 1 (а); тока в конденсаторной батарее (б) [3]

Множество экспериментальных исследований показало, что в СЭ промышленных предприятий, имеющих в своей структуре вентильные преобразователи, не синусоидальность напряжения обычно превышает допустимые пределы, иногда на 20%. Из всего выше перечисленного следует необходимость не допускать резонанс в сетях с конденсаторными батареями.

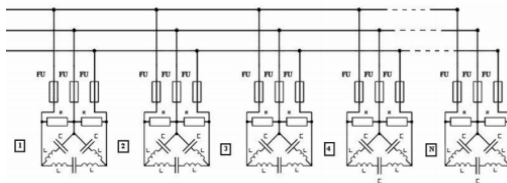


Рис. 3. Принципиальная схема КРМ с использованием фильтра высших гармоник

Для решения данной проблемы необходимо включить последовательно с каждым конденсатором фильтр высших гармоник (трехфазный дроссель) таким образом, чтобы система фильтр-конденсатор имела индуктивный характер на критических частотах, и емкостной характер на главной частоте (см. рисунок 3). Главное условие, необходимое для выполнения данного решения, заключается в том, чтобы цепь из последовательного включенного конденсатора и фильтра должна иметь резонансную частоту меньше наименьшей критической гармоники. При этом не стоит забывать, что с установкой фильтра

гармоник возрастает напряжение на конденсаторе. Перед внедрением конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности, необходимо проводить замеры качества электроэнергии, выявить присутствующие в сети гармоники, рассчитать возможность резонансов в сети. Также в сетях со специфическими нагрузками имеются определенные особенности, которые необходимо учитывать при компенсации реактивной мощности:

1) Из-за низкого cosφ потребителей и резко переменного характера нагрузки необходимо компенсировать не только постоянную, но и переменную составляющую реактивной мощности. Компенсация второй необходима для уменьшения пульсации напряжения в питающей сети.

2) Необходимо изменять регулируемую реактивную мощность с быстротой, соответствующей скорости изменения потребляемой реактивной мощности. Лучшее решение – использование тиристорных конденсаторных установок. В отличие от контакторных установок, они обладают быстродействием на 2 порядка выше, это объясняется тем, что коммутация тиристоров происходит в момент времени, когда напряжение на конденсаторе и в сети имеют равные значения. Задержка включения составляет не более 20 мс.

3) Из-за присутствия в сети высших гармоник тока и напряжения, при нелинейных нагрузках ограничивается возможность применения конденсаторных батарей для компенсации постоянной компоненты реактивной мощности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Фролов В.Я., Зверев С.Г., Маркелов В.В., Скорняков В.А., Иванов С.А., Иванов Д.В. и др. Проектирование электроснабжения промышленных предприятий и гражданских систем. Учебное пособие. СПбГПУ, 2012. – 384 с.
2. Шеховцов В.П. Расчет и проектирование схем электроснабжения. Методическое пособие для курсового проектирования. ФОРУМ, 2010. – 214 с.
3. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 472 с.
4. Паули В.К. Компенсация реактивной мощности как эффективное средство рационального использования электроэнергии. Энергоэксперт. 2007. – 20 с.

УДК 621.365

И.С. Черников, Ю.В. Мурашов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ УСТРОЙСТВА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ ЧАСТНОГО ДОМА

Введение. Стремление общества к комфорту и независимости от природных условий и случайных факторов привело к созданию множества бытовых электроприборов небольшой мощности. В силу относительной стабильности электроснабжения в электросетях Российской Федерации, а также возможности проведения линий питания даже в отдалённые от крупных населённых пунктов территории, распространение получили системы электрического обогрева жилых помещений. В последние годы всё более широкую популярность стала приобретать система под названием “тёплый пол”, позволяющая использовать в качестве радиатора всю поверхность пола жилого помещения.

Целью работы является разработка модели устройства индукционного нагрева воды для системы отопления.

Актуальность. Перспективным направлением развития отопительной системы “тёплый пол” является использование индукционных устройств с водой в качестве теплоносителя. К преимуществам данной системы перед распространёнными на данный момент можно отнести относительную простоту конструкции, быстроту первичного нагрева теплоносителя, компактность и длительный безремонтный промежуток.

Индукционные нагреватели могут быть использованы в системах отопления и горячего водоснабжения. На рис. 1 показана схема подключения индукционного подогревателя к системе отопления.

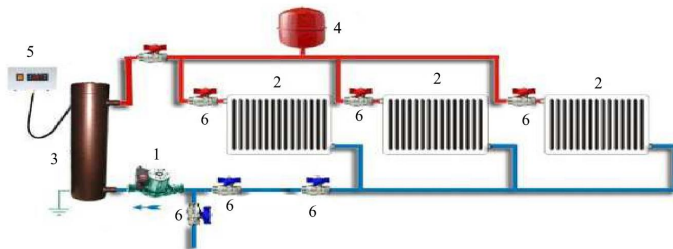


Рис. 1. Схема подключения индукционного нагревателя к системе отопления:
 1 – циркуляционный насос; 2 – радиаторы отопления; 3 – индукционный нагреватель;
 4 – мембранный бак; 5 – пульт управления; 6 – кран

В схеме присутствует индукционный нагреватель, куда входят цилиндрическая ёмкость с входным и выходным патрубками, выполняющая функцию магнитопровода, наружные и внутренние индукционные обмотки, цилиндрические и круговые распределители потока жидкости, изоляционные прокладки.

Нагрев воды происходит за счет теплопередачи от стенок цилиндрической ёмкости, которые, в свою очередь, нагреваются вихревыми токами, индуцируемыми обмотками, к тонким слоям холодной жидкости, разделенным системой распределителей теплового потока. Исходя из бытового назначения установки индукционного нагрева, в качестве материала труб, осуществляющих передачу тепловой энергии к теплоносителю, была выбрана Сталь 0.8.

Величины, используемые в качестве вводных данных для моделирования, выполняемого в программе COMSOL Multiphysics, получены из следующих расчетов [1, 2].

Частота тока в индукторе:

$$f = \frac{503^2 \cdot \rho_e}{\mu \cdot d},$$

где d – толщина стенки трубы, ρ_e – удельное сопротивление материала, ω – угловая частота, μ – магнитная проницаемость среды, f – частота.

Зная толщину стенки рассматриваемой трубы d , можно найти частоту тока индуктора f , при которой глубина проникновения Δ совпадёт с толщиной стенки d .

Поскольку при частоте, получаемой из данной приближенной формулы, в стенке трубы будет выделяться только 85% всей мощности, передаваемой электромагнитным полем в металл, имеет смысл внести поправку в параметр d . В результате предварительного моделирования была получена зависимость: при неизменной мощности увеличение частоты до определенных пределов увеличивает и температуру, до которой нагревается труба. Наибольшая температура была достигнута при частоте, соответствующей принятой поправке. В формулу подставим значение d , умноженное на 0,85.

Время нагрева (до нужной температуры, в отсутствии теплоносителя):

$$t_k = \frac{d^2}{a} \cdot \frac{S(\alpha,0) - \frac{T_0}{T_d} S(\alpha,1)}{\frac{T_0}{T_d} - 1},$$

где $S(\alpha,0)$, $S(\alpha,1)$ – вспомогательные функции для цилиндрических заготовок, d – толщина стенки трубы, T_0 и T_d – температуры на внешней и внутренней поверхности соответственно, a – температуропроводность.

Температуропроводность:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho},$$

где λ – теплопроводность, c_p – удельная теплоёмкость, ρ – плотность.

Средняя полезная мощность:

$$P_T = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T_{cp}}{t_k},$$

где m – масса трубы, ΔT_{cp} – средняя температура по сечению трубы.

Ток индуктора:

$$I = \sqrt{\frac{P}{R}},$$

где P – мощность, потребляемая установкой, R – сопротивление индуктора.

Мощность выбирается из расчета на 150м^2 площади, при высоте потолков 3м. Сопротивление индуктора определяется в ходе первой итерации моделирования, при подстановке оценочной величины тока.

Заданные параметры питания обеспечиваются системой выпрямитель-инвертор [3, 4], включающей автономный драйвер для полумостового инвертора IR2153(S), который позволяет выставить необходимую частоту на основании всего лишь подбора двух элементов схемы: резистора и конденсатора. Схему включения драйвера и подбираемых элементов поставщик приводит в технической документации.

Моделирование проводится для установившегося режима, при заданных коэффициентах теплоотдачи, учитывающих передачу тепла в жилые помещения и его потерю в процессе охлаждения дома. В таблице 1 приведены исходные данные для моделирования. Также присутствует охлаждение индуктора отдельным потоком воды, проходящим внутри медной трубки, из которой выполнен индуктор.

Таблица 1. Исходные данные для моделирования

Наименование	Обозначение	Значение	Единица измерения
Частота тока индуктора	f	215	Гц
Средняя полезная мощность	P_T	3,4	кВт
Сопротивление индуктора	R	1,25	Ом
Ток индуктора	I	120	А
Диаметр трубы	D	26,8	мм
Толщина стенки трубы	d	3,4	мм
Габариты индуктора	-	150/60/40	мм
Расход воды	-	0,4	л/с

Результаты моделирования показаны на рис. 2.

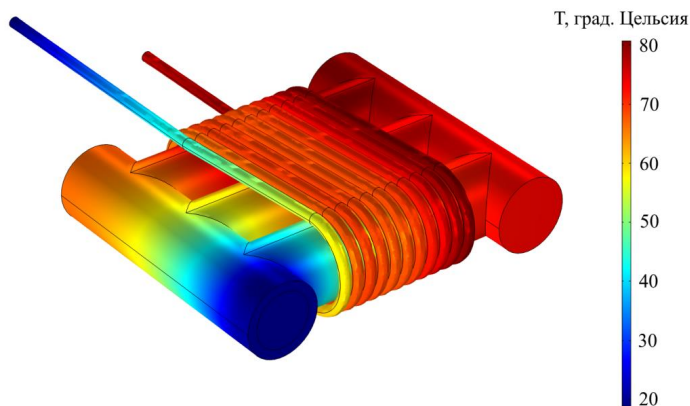


Рис. 2. График распределения температуры

Выводы: По результатам расчетов и моделирования видно, что в установившемся режиме при подаче в устройство воды с температурой 20 градусов Цельсия, можно постоянно получать на выходе около 80-ти градусов, что соответствует СНиП для системы отопления.

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.Н. Иванов. Индукционный нагрев металлов. Теория и практика: учеб. пособие / В.Н. Иванов, В.Я. Фролов, Д.В. Иванов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 360 с.
2. А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. Индукторы для индукционного нагрева. Изд-во Энергия Ленинградское отделение, 1974. – 264 с.
3. В.Я. Фролов. Силовая электроника: учеб. пособие/ В.Я. Фролов, В.В. Смородинов, С.Г. Зверев. – СПб: Изд-во Политехн. Ун-та, 2011. – 280 с.
4. Ю.С. Забродин. Промышленная электроника: Учебник для вузов. Второе издание, стереотипное. – М.: ООО ИД «Альянс», 2016. – 496 с., ил.

УДК 537.523.5

А.С. Чистяков¹, А.Н. Чусов², И.С. Савельева¹, С.Ю. Грачев¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
²АО «НПО «Стример»

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИИ В МУЛЬТИКАМЕРНОМ РАЗРЯДНИКЕ

Мультикамерные разрядники (РМК) успешно применяются для молниезащиты линий электропередачи (ЛЭП) разных классов напряжения. В виду значительной трудоёмкости разработки и испытания прототипов всё большее внимание уделяется применению методов численного моделирования при проектировании новых устройств. Использовавшиеся до сих пор подходы к моделированию РМК не учитывали влияние механической деформации. Данная работа посвящена разработке модели дугового разряда в РМК, учитывающей

изменение формы разрядной камеры под действием плазменной струи. Анализ предварительных результатов расчётов, полученных для импульса тока 20 кА, подтверждает, что новая модель может точнее описывать горение разряда.

Введение. Мультикамерные разрядники (РМК) применяются для защиты линий электропередачи от последствий попадания молнии [1]. Основная функция РМК – прерывание тока короткого замыкания, вызванного грозovým перенапряжением. Конструкция РМК состоит из повторяющихся элементов – разрядных камер (РК). Пример РК приведён на рис. 1. РК представляет из себя искровой промежуток, дополненный соплом, как правило, для изготовления РК применяется силиконовая резина. При грозовом перенапряжении в каждой РК происходит электрический пробой и формируется канал дугового разряда, что приводит к одновременному протеканию импульсного тока молнии и тока сети через РМК. Избыток давления и воздействие силы Лоренца приводят к интенсивному истечению плазмы из РК, в результате чего происходит прерывание тока КЗ. При этом РК под действием высокого давления может заметно менять форму, что видно на кадрах теневой съёмки, представленных на рис. 2. Такие изменения могут влиять на течение газа и должны учитываться при проектировании РК, в том числе и на этапе математического моделирования.

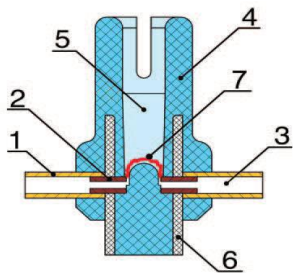


Рис. 1. Разрядник мультикамерного типа

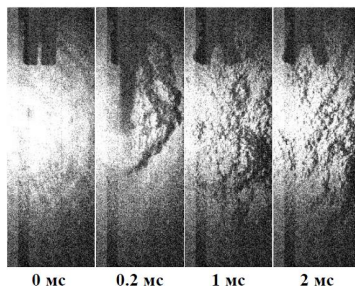


Рис. 2. Теневая съёмка течения газа из РК

Математическая модель разряда в РК. Для описания истечения плазмы разряда из РК изначально был выбран подход, обычно применяемый для моделирования термической плазмы, – система уравнений магнитогидродинамики (МГД). Реализация этого подхода для РМК подробно описана в [2], [3]. В систему входят уравнения Навье-Стокса (1)–(3), описывающие перенос вещества, импульса и энергии в дуге, и уравнения Максвелла (4)–(5), описывающие протекание тока в разряде и индуцированное им магнитное поле. Для замыкания системы необходимо задать уравнения состояния (6)–(7).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \tau + [\vec{j} \times \vec{B}] \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho \vec{h})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{h} \vec{u}) = \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla(\tau \vec{u}) + \vec{j} \cdot \vec{E} + \nabla(\vec{q} + \vec{q} \text{ rad}) \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \quad (4)$$

$$[\nabla \times \vec{B}] = \mu_0 \vec{j} \quad (5)$$

$$\rho = \rho(T, p) \quad (6)$$

$$h = h(T, p) \quad (7)$$

Также необходимы зависимости от температуры и давления для вязкости, теплопроводности и электрической проводимости [3]. В совокупности с заданным импульсом тока приведенные уравнения позволяют моделировать течение плазмы в сопле с заданной геометрией. Для учёта изменения формы сопла необходимо ввести в рассмотрение уравнения, описывающие механические напряжения и деформацию РК:

$$\rho \frac{\partial^2 \vec{U}}{\partial t^2} = \nabla \vec{\sigma} + \vec{f}. \quad (8)$$

Здесь \vec{U} – это вектор деформации, $\vec{\sigma}$ – тензор напряжений, \vec{f} – объёмная сила. Также задается зависимость напряжения от деформации, соответствующая материалу РК.

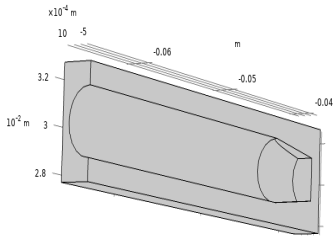


Рис. 3. Геометрия РК

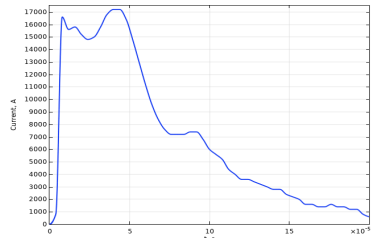


Рис. 4. Импульс тока 20 кА для расчета

Результаты моделирования. Трёхмерная модель конструкции РК, использовавшейся при моделировании, приведена на рис. 3. Расчёты были проведены для тока с пиковым значением 20 кА, форма импульса тока изображена на рис. 4. Длительность расчёта задавалась равной 200 мкс, характерной длительности импульса тока молнии. Рассчитанное для 50-ой мкс распределение деформации РК представлено на рис. 5. Видно, что деформации значительные и заметно изменяют геометрию РК. На рис. 6 представлено сравнение экспериментального напряжения с расчётным, полученным двумя методами – без учёта и с

учёт деформации РК. Заметно, что в последнем случае расчётная кривая ближе к экспериментальной.

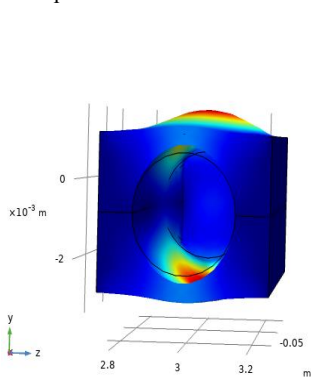


Рис. 5. Геометрия РК

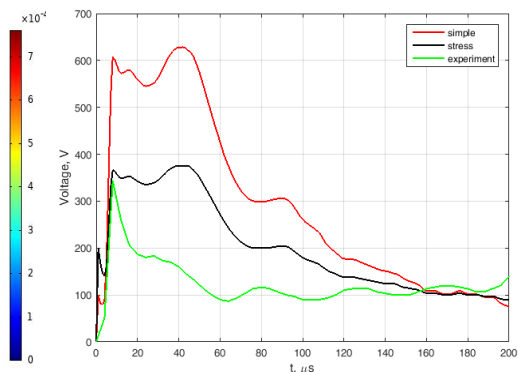


Рис. 6. Сравнение эксперимента с расчетом

Выводы. Предварительные результаты моделирования дугового разряда в РК с помощью улучшенной математической модели показали, что учёт деформации сопла РК в модели в РМК позволил улучшить согласие с экспериментальными данными.

ЛИТЕРАТУРА:

1. G. V. Podporkin, E.Yu. Enkin, E. S. Kalakutsky, V. E. Pilshikov, A. D. Sivaev. "Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters." IEEE Transactions on Power Delivery, 26(1):214-221, 2010.
2. G. V. Podporkin, E.Yu. Enkin, E. S. Kalakutsky, V. E. Pilshikov, and A. D. Sivaev. "Development of multi-chamber insulator-arresters for lightning protection of 220 kv overhead transmission lines." In Lightning Protection (XI SIPDA), 2011 International Symposium on, pages 160-165, 2011.
3. B. Swierczynski, J. J. Gonzalez, P. Teulet, P. Freton, A. Gleizes. "Advances in low-voltage circuit breaker modelling." Journal of Physics D: Applied Physics, 37(4):595-609, 2004.

УДК 621.387.143

Д.А. Гольшев, С.Ю. Грачев, А.П. Веселовский, С.Г. Зверев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЗАЖИГАНИЕ ПЛАЗМЫ В ВЧИ-ПЛАЗМОТРОНЕ ВОЗДУШНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ

Высокочастотный индукционный (ВЧИ) плазмотрон – это устройство, позволяющее получать и стационарно удерживать плазму с температурой $(7...10) \cdot 10^3$ К. Принцип действия ВЧИ-плазмотрона основан на высокочастотном безэлектродном разряде в газоразрядной камере, который возбуждается переменным электромагнитным полем индуктора. Разряд представляет собой безэлектродный кольцевой ток в ионизированном газе, где плазма не загрязнена посторонними примесями, т.к. не имеет постоянного контакта с электродами в зоне разряда.

Известен способ поджига индукционного разряда в ВЧИ-плазмотроне и устройство для его осуществления, где в качестве способа поджига на выходе узла подачи плазмообразующего газа производится высоковольтный разряд с помощью игнайтера, в

конструкции которого поджигающий электрод совершает возвратно-поступательное перемещение с помощью пневмоцилиндра. Недостатком способа является тот факт, что разряд высоковольтного высокочастотного напряжения осуществляется между электродом и стенкой разрядной камеры. Разряд может привести к прожогу секции разрядной камеры и выходу плазмотрона из строя, что нередко случается на практике.

Предлагается новый способ, достоинством которого является зажигание разряда между выводами вторичной обмотки воздушного трансформатора, где разрядная камера не участвует в образовании электронно-ионной проводящей среды.

При включении генератора напряжение высокой частоты поступает на нагрузку – индуктор, формирующий высокочастотный кольцевой разряд. Однако для получения начальной стадии разряда необходимо в газовой струе, протекающей через индуктор, сформировать проводящую электронно-ионную среду, развивающуюся в кольцевой разряд [1].

Задачу формирования среды (индукционной плазмы), проводящей электрический ток, выполняет зажигающее устройство, на короткое время (несколько секунд) вводимое в область индуктора, и образующее с ним воздушный трансформатор [2] (рис.1).

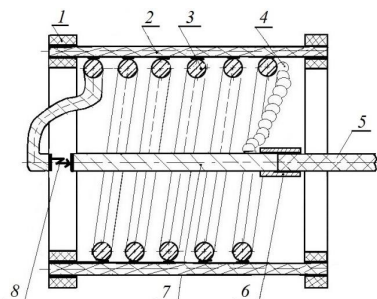


Рис. 1. Воздушный трансформатор: 1 – изолирующие кольца; 2 – диэлектрические стержни для крепления витков; 3 – вторичная обмотка «воздушного трансформатора»; 4 – гибкий проводник; 5 – подвижный шток; 6 – соединительная муфта; 7 – подвижный контакт; 8 – электрическая дуга

Потокоцепление M воздушного трансформатора, возникающее в результате взаимной индукции, связывает магнитные потоки индуктора и воздушного трансформатора. Конструкция воздушного трансформатора состоит из нескольких витков (до 10-ти) высокоомного провода в виде спирали (пружины) со свободными выводами, образующими коммутационный узел, помещенный в изоляционный каркас с окнами и щелями для пропуска плазмообразующего газа [3]. Изолирующий каркас необходим для устранения коротких замыканий обмотки индуктора с обмоткой зажигающего устройства или с охлаждающим устройством щелевого плазмотрона. Т.к. обмотки (катушки) индуктора и зажигающего устройства расположены на расстоянии, близком друг от друга (10...20 мм) и содержат w_1 и w_2 витков, то магнитное поле тока индуктора распространяется на область обмотки зажигающего устройства (рис. 2).

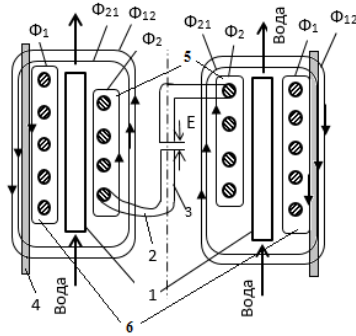


Рис. 2. Магнитные потоки в воздушном трансформаторе: 1 – секция охлаждения плазмотрона; 2 – гибкий проводник; 3 – подвижный контакт; 4 – кварцевая труба; 5 – первичная обмотка «воздушного трансформатора»; 6 – вторичная обмотка «воздушного трансформатора»

Изменение магнитного потокосцепления Ψ взаимной индукции приводит к возбуждению в индуктивно связанных обмотках воздушного трансформатора ЭДС e_2 взаимной индуктивности M

$$e_2 = -\frac{d\Psi}{dt} = -M \frac{di}{dt}.$$

Значение взаимной индуктивности M в основном зависит от числа витков индуктора зажигающего устройства, их формы и взаимного расположения. Следует учитывать также магнитные характеристики охлаждающего устройства щелевого плазмотрона, материала обмотки зажигающего устройства, изолирующего каркаса и струи плазмообразующего газа [4].

Степень индуктивной связи индуктора и катушки зажигающего устройства может изменяться в процессе зажигания плазмы, т.к. при замыкании катушки зажигающего устройства в ней протекает ток, оказывающий влияние на магнитный поток Φ_{21} взаимной индукции M .

Коэффициент индуктивной связи k катушек индуктора и зажигающего устройства:

$$k = \sqrt{\frac{\Phi_{21} \cdot \Phi_{22}}{\Phi_1 \cdot \Phi_2}} = \sqrt{\frac{M w_1 \cdot M w_2}{L_1 w_1 \cdot L_2 w_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} < 1,$$

где Φ_{12} и Φ_{21} – магнитные потоки взаимоиндукции индуктора с зажигающим устройством и зажигающего устройства с индуктором; Φ_1 и Φ_2 – магнитные потоки самоиндукции индуктора и зажигающего устройства.

На рис. 2 показаны воздухоохлаждаемые секции щелевого плазмотрона, которые располагаются между обмотками индуктора и зажигающего устройства [5]. Для зажигания кольцевого разряда в плазме необходимо кратковременно внести в разрядную камеру щелевого плазмотрона обмотку зажигающего устройства и замкнуть подвижный контакт. При размыкании контактной пары возникает электрический дуговой или искровой разряд вследствие высокого напряжения на вторичной обмотке воздушного трансформатора. Для ограничения тока короткого замыкания вторичной обмотки трансформатора ее выполняют из высокоомного материала (например нихрома). Напряжение на вторичной обмотке может достигать 5...10 кВ, что позволяет организовать дуговой или искровой разряд, который перерастает в кольцевой индукционный.

В заключении следует отметить, что с целью создания в зоне кольцевого разряда электронно-ионной проводящей среды со стороны выхода плазмотрона внутрь разрядной камеры кратковременно вводят поджигающее устройство в виде воздушного трансформатора в изолирующем каркасе с окнами для пропускания плазмообразующего газа и устройством с контактом для кратковременной коммутации вторичной обмотки воздушного трансформатора, что в итоге упрощает конструкцию зажигающего устройства, снижает вероятность коротких замыканий неизолированных элементов плазмотрона и зажигающих устройств, например, дугового типа.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Патент RU 2440701 С, Н05Н1/00, опубл. Бюл.2, 20.01.2012. Устройство для зажигания кольцевого индукционного разряда.
2. Коротеев А.С., Миронов В.М., Свирчук Ю.С. Плазмотроны. Конструкции, характеристики, расчет. М.: Машиностроение, 1993, 205 с.
3. Клименко Г.К., Лялин А.А. Конструкции электродуговых плазмотронов. Учебное пособие по дисциплине «Генераторы плазмы», М.: МГТУ им. Баумана, 2010.
4. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Плазмотроны: конструкции, параметры, технологии. Уч. Пособие. СПб, Изд-во Политехн. Ун-та, 2007, 208 с.
5. Дресвин С.В., Зверев С.Г. Теплообмен в плазме. Уч. Пособие. СПб, Изд-во Политехн. Ун-та, 2008, 212 с.

УДК 621.365

К.В. Харламова, Ю.В. Мурашов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА БЫТОВОГО ИНДУКЦИОННОГО ПРОТОЧНОГО ВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ 3 КВТ

Актуальность исследования, посвященного разработке бытового индукционного проточного водонагревателя, диктуется несколькими причинами: проблема горячего водоснабжения в России и необходимость снижения его стоимости и опасности.

Высокая бытовая безопасность, соответствие современным экологическим требованиям, высокий КПД практически без потерь превращающейся в тепло энергии, делают электрические водонагреватели наиболее перспективным решением.

Целью работы являлась разработка устройства бытового индукционного проточного водонагревателя.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Описать конструкцию и принцип работы устройства индукционного нагрева;

- Разработать динамическую модель рабочей части устройства в программе COMSOL Multiphysics.

Так как для проектируемой установки индукционного водонагревателя важной характеристикой является коррозионная стойкость деталей, которые находятся в прямом контакте с теплоносителем – водой, в качестве материала изготовления труб была выбрана Сталь 0.8.

Для наглядности представления, значения параметров трубы и стали 0.8 сведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры трубы и стали 0.8

Параметр	Обозначение	Величина
Внешний диаметр трубы	D	26.8 мм
Внутренний диаметр трубы	D _i	20 мм
Толщина стенки	d	3.4 мм
Удельное сопротивление	ρ	14,7·10 ⁻⁸ Ом/м
Магнитная проницаемость	μ	22 Гн/м

Из формулы для частоты (1) с учетом поправки в параметр толщины стенки трубы получим [1]:

$$f = \frac{503^2 \cdot \rho}{\mu \cdot d} = 215 \text{ Гц} \quad (1)$$

Время нагрева вычисляется [1] по формуле (2):

$$t_k = \frac{d^2}{a} \cdot \frac{S(\alpha, 0) - \frac{T_0}{T_d} S(\alpha, 1)}{\frac{T_0}{T_d} - 1}, \quad (2)$$

Температуропроводность a может быть рассчитана [1] по формуле (3):

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}, \quad (3)$$

Подставив в формулу (3) значения величин, приведённые в табл. 1, получим значение температуропроводности: $a = 1,66 \cdot 10^{-5}$, м²/с

В качестве желаемой температуры нагрева примем $T_0 = 60^\circ\text{C}$. Разность же температур между внешней и внутренней поверхностью, в силу небольшой толщины стенки трубы, не превысит значения в 5°C , что позволяет принять $T_1 = 55^\circ\text{C}$. Результатом вычислений по формуле (2) станет значение времени нагрева: $t_k = 1,601$ с. Зная время нагрева, можно рассчитать [2] среднюю полезную мощность по формуле (4):

$$P_T = \frac{m \cdot c_p \cdot \Delta T_{cp}}{t_k}, \quad (4)$$

Принимая длину трубы $l=0,1$ м несложно рассчитать ее массу. Тогда при $\Delta T_{cp} = 55,5^\circ\text{C}$, мощность составит: $P_T = 3,28$ кВт

Произведенные расчёты показывают, что выбор стали 0.8 в качестве нагреваемого индуктором материала целесообразен не только из соображений санитарии, он так же повышает экономичность установки.

Для решения поставленной задачи в COMSOL Multiphysics, помимо геометрии необходимо задать всего 3 параметра: частота, ток и поток жидкости, проходящий через трубку. Предварительные расчеты позволили получить частоту. Поток жидкости был задан исходя из номинального расхода воды в системе городского водоснабжения (6,7 л/мин).

Задача по определению тока была решена итерационно:

$$R_{\text{инд}} = 5,72 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}$$

$$L = 5,35 \cdot 10^{-6} \text{ Гн.}$$

Зная сопротивление при помощи формулы (5) можем рассчитать значение тока, которое необходимо подвести к индуктору, исходя из заданной мощности [3].

$$P = I^2 R, \quad (5)$$

$$I = 25 \text{ А.}$$

Геометрические параметры нагреваемой трубы с теплоносителем. Согласно ГОСТ 3262-75 «Трубы стальные водогазопроводные. Технические условия»:

Внутренний диаметр трубы (условный проход) $D_{2\text{in}} = 20 \text{ мм}$;

Наружный диаметр $D_{2\text{out}} = 26,8 \text{ мм}$;

Длина нагреваемого участка трубы $l_2 = 100 \text{ мм}$.

3D модель индуктора представлена на рис. 1.

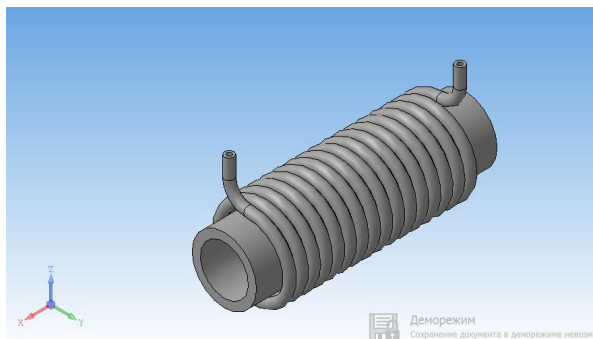


Рис. 1. Модель индуктора с трубкой в «Компас-3D»

Поскольку геометрия почти инвариантна относительно центральной линии, модель решается в двумерной осесимметричной плоскости. Построение было проведено в 2D Axisymmetric. Немаловажным преимуществом двумерной осесимметричной модели, является скорость вычислений. Сечение модели индуктора представлено на рис. 2.

На рис. 3 приведен график распределения температуры в индукторе.

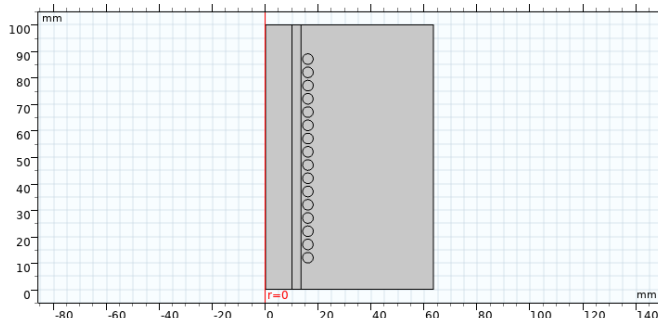


Рис. 2. Сечение модели системы индукционного нагрева

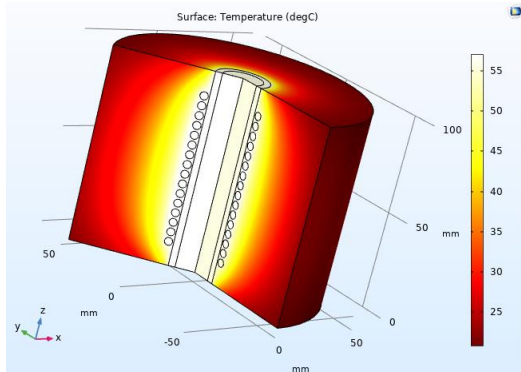


Рис. 3. Распределение температуры в индукторе

Из результатов моделирования видно, что поставленная задача была выполнена. Вода в индукторе нагревается до необходимых значений. А именно: температура воды на выходе из водонагревателя: 54,4 °С, температура индуктора: не превышает 60 °С, расход воды: 6,7 л/мин, частота: 200 Гц, мощность: 3 кВт, ток: 25 А.

ЛИТЕРАТУРА:

1. В.Н. Иванов. Индукционный нагрев металлов. Теория и практика: учеб. пособие / В.Н. Иванов, В.Я. Фролов, Д.В. Иванов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 360 с.
2. А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунэр. Установки индукционного нагрева: учебное пособие для вузов. Под ред. А.Е. Слухоцкого. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. Отд-ние, 1981. – 328 с.
3. А.Е. Слухоцкий, С.Е. Рыскин. Индукторы для индукционного нагрева. Изд-во Энергия Ленинградское отделение, 1974. – 264 с.

УДК 644.1:65.5

О.Э. Игнашин

Северо-Западный институт управления – филиал РАНХиГС

ЭЛЕКТРО-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА ОТОПЛЕНИЯ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ

На сегодняшний день в Российской Федерации сформировалась проблема, связанная с устаревшими подходами в сфере теплоснабжения, что явилось причиной серьезного отставания российской энергетики от мирового уровня. Это обусловлено как низкой тепловой защитой существующих зданий, так и целым рядом особенностей работы систем централизованного теплоснабжения: многочисленными авариями из-за значительного износа тепловых сетей, потерями тепловой энергии и теплоносителя при транспортировке от источника к потребителю, отсутствием индивидуальных приборов учёта тепловой энергии в квартирах, перепадами давления в системе, приводящими к прорывам трубопроводов внутри помещений многоквартирных домов, неравномерным распределением тепла по ходу системы отопительного контура многоквартирного дома. Происходит постоянное увеличение тарифов на отопление и горячее водоснабжение для населения по причине возрастающих затрат на обслуживание, плановый ремонт и замену ветшающих тепловых сетей, ликвидацию аварий [1].

В качестве альтернативы существующей системе централизованного теплоснабжения предлагается переход на поквартирное воздушное отопление с применением электро-преобразовательной системы отопления (далее – ЭПС-отопление).

Основными элементами ЭПС-отопления являются (рис. 1):

- приточно-вытяжная система вентиляции с электронагревательным и теплорекуперационным теплообменниками;
- низкоэмиссионные окна с электрообогревом стекол;
- теплозащитные токопроводящие экраны, устанавливаемые на внутренних поверхностях наружных горизонтальных ограждающих конструкций здания.

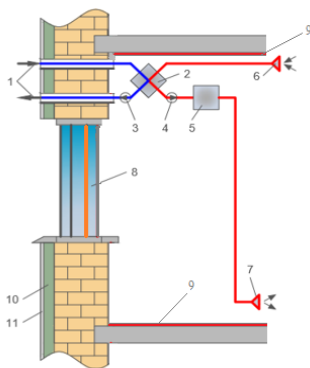


Рис. 1. Принципиальная схема ЭПС-отопления отдельной квартиры:

- 1 – входной и выходной воздуховоды; 2 – теплорекуператор; 3 – вытяжной вентилятор;
- 4 – приточный вентилятор; 5 – электрокалорифер; 6 – воздухозаборное устройство;
- 7 – устройство подачи воздуха в помещение; 8 – внутреннее стекло энергосберегающего окна-стеклопакета с электрообогревом; 9 – теплозащитный экран с электрообогревом;
- 10 – наружный слой тепловой изоляции; 11 – защитный слой тепловой изоляции

Система работает следующим образом. Наружный воздух под действием всасывающего вентилятора по воздуховоду поступает в теплорекуператор, где повышает свою температуру за счет теплоты внутреннего воздуха, удаляемого из помещения с помощью вытяжного вентилятора. Окончательное догревание наружного воздуха до требуемой температуры, поддерживаемой внутри отапливаемого помещения, происходит в электрокалорифере [2]. Дополнительно происходит снижение тепловых потерь через окна и наружные горизонтальные ограждающие конструкции здания (пол первого этажа и потолок последнего) с помощью токопроводящего теплозащитного экрана. Таким образом, в отапливаемом помещении сохраняется заданный уровень температуры воздуха.

Приточно-вытяжная система вентиляции выполняется в виде компактного теплорекуператора с встроенным в него электрокалорифером. Мощность установки варьируется в зависимости от площади отапливаемого помещения. В жилых многоквартирных домах предлагается устанавливать один теплорекуператор в каждой квартире вне зависимости от количества комнат. Входной и выходной воздуховоды холодной части системы выводятся либо непосредственно на фасад жилого дома, либо в общий вентиляционный канал, конструкция которого предусматривает разделение воздуха на два потока по всей длине канала.

Наибольшая доля тепловых потерь через ограждающие конструкции здания приходится на окна, поскольку на стеклах отсутствует какая-либо тепловая изоляция,

способная повысить их термическое сопротивление. В качестве решения данной проблемы предлагается следующая конструкция окон.

Стеклопакет представляет собой многослойный блок, состоящий из набора следующих стекол (рис. 2).

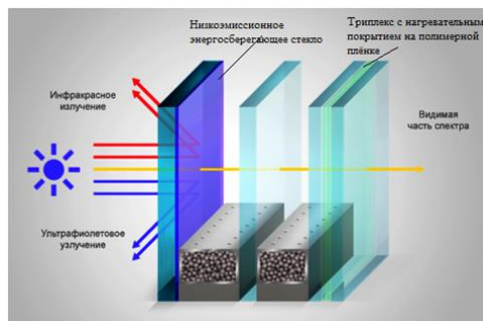


Рис. 2. Предлагаемая конструкция низкоэмиссионного окна с электрообогревом

Внешнее стекло (со стороны улицы) – энергосберегающее, имеет на внутренней поверхности низкоэмиссионное покрытие на основе оксида серебра, уменьшающее тепловые потери. Покрытие наносится на поверхность стекла и ламинируется полимерной пленкой. Камеры между стеклами заполнены аргоном. Внутреннее стекло (со стороны помещения) выполнено в виде отдельного триплекса: между двумя закаленными стеклами находится нагревательный элемент – полимерная пленка, внутри которой нанесено тончайшее однородное светопрозрачное токопроводящее покрытие на основе оксида цинка. Пленка плотно прилегает к поверхности обоих стекол и является с ними единым целым. Нагревательный элемент может работать от сети переменного тока с напряжением 220 В, или на более низком напряжении – 24 В. Токоподводящие электроды располагаются по бокам стекла в толще пленки в виде более толстого напыления [3].

Теплозащитный экран выполняется из токопроводящей карбоновой пленки, либо из полимерной пленки, внутри которой находится нагревательное покрытие на основе оксида цинка (то же, что в окнах с электрообогревом стекол). Суть работы теплозащитного экрана, подобно окнам с электрообогревом стекол, сводится к нивелированию влияния тепловых потерь на температуру воздуха внутри отапливаемого помещения посредством ликвидации температурного напора между воздухом и поверхностью экрана.

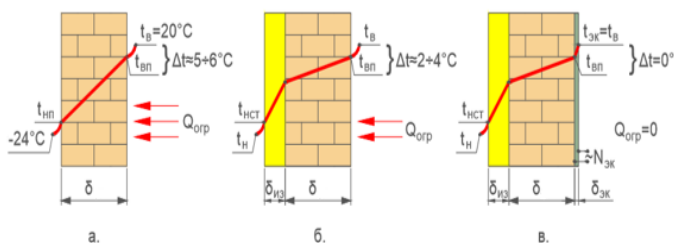


Рис. 3. Графики изменения температуры воздуха и наружной ограждающей конструкции: а – в исходном состоянии; б – с использованием утеплителя; в – с использованием утеплителя и теплозащитным экраном

Как видно из рис. 3, б, установка утеплителя на наружном ограждении приводит к снижению разности температур воздуха и поверхности этого ограждения за счет повышения его температуры. При этом температурный напор снижается до величины $\Delta t = t_{вп} - t_{вн} = 2 - 4$ °С. Подача напряжения на теплозащитный экран и прохождение по нему электрического тока, приводит к повышению температуры экрана $t_{эк}$ до температуры воздуха $t_{в}$ и, следовательно, к исчезновению температурного напора между воздухом и поверхностью экрана: $t_{эк} = t_{вп}$, $\Delta t = t_{вп} - t_{эк} = 0$, при этом влияние тепловых потерь через ограждающие конструкции можно свести к нулю: $Q_{огр} = Q_{вп} = 0$.

Для согласованной работы всех трех элементов ЭПС-отопления предлагается соединить их единой системой автоматического управления и регулирования, учитывающей температуру воздуха снаружи и внутри помещения посредством встроенных термодатчиков. Данная система помещается в миниатюрный блок.

На примере существующего типового пятиэтажного панельного жилого дома серии 1-507, расположенного в Санкт-Петербурге, было определено, что переход на ЭПС-отопление позволяет снизить общее энергопотребление жилого дома с 378,84 кВт до 117,72 кВт [3]. Годовые затраты на отопление с 5 025 894 р. 51 к. снижаются до 1031227 р. 20 к. Ежегодная экономия для жителей дома составляет 3994667 р. 31 к.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гладышев Н.Н., Москалев А.А. Определение потенциала энергосбережения в системах теплоснабжения ЖКХ // Вестник энергоэффективности. 2013 №2 с.30-34.
2. Гладышев Н.Н., Луканин П.В. Ресурсосберегающие системы энергоснабжения потребителей ЖКХ // Вестник энергоэффективности Минобрнауки России. 2015 №1 с.86-92.
3. Игнашин О. Э. Снижение тепловых потерь через окна // Межвуз. сб. науч. тр. "Энергетика, экология и бизнес": материалы Международной научно-практической конференции обучающихся и преподавателей / Под редакцией Т.Ю. Коротковой; сост. М.С. Липатов; ВШТЭ СПбГУИПД. – СПб., 2018. Вып. 2 – 210 с.

УДК 621.316

В.А. Черенков, Д.В. Иванов, В.Я. Фролов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ВАКУУМНОЙ ДУГОГАСИТЕЛЬНОЙ КАМЕРЫ 10 КВ, 20 КА С АКСИАЛЬНЫМ И РАДИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Вакуумные дугогасительные устройства достаточно широко распространены в выключателях среднего класса напряжения [1 – 3]. При этом конструкции контактов в таких системах отличаются многообразием.

Целью данной работы является определение конструкции контактной системы, обеспечивающей более эффективное отключение тока в вакуумной дугогасительной камере (ВДК) 10 кВ, 20 кА, а именно, выбор между контактами с аксиальным магнитным полем (axial magnetic field – AMF) и контактами с радиальным магнитным полем (radial magnetic field – RMF) при одинаковом диаметре контактов и одинаковом расстоянии между ними. Такой выбор может быть сделан на основе сравнения отключающей способности – основного параметра, определяющего качественную и надёжную работу ВДК, для двух исследуемых конструкций.

Основной метод исследования – моделирование в среде Comsol Multiphysics.

Общий вид исследуемых конструкций контактных систем представлен на рис. 1. Начальный радиус контактных пластин: 22 мм (будет меняться с целью отключения тока 20 кА); длина каждого контакта: 70 мм; расстояние между контактами: 5 мм.

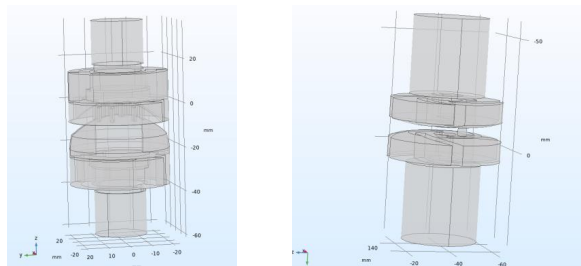


Рис. 1. Общий вид контактной системы AMF(слева) и RMF(справа)

Чтобы оценить отключающую способность, необходимо рассчитать распределение индукции магнитного поля в зазоре между электрическими контактами ВДК.

Для расчетов использовались следующие модули COMSOL Multiphysics: COMSOL Multiphysics, AC/DC Module, CAD Import Module. В таблице 1 приведены используемые параметры модели.

Таблица 1. Параметры модели в среде COMSOL Multiphysics

Наименование	Величина	Размерность	Описание
$I_{н.откл}$	20000	А	Номинальный ток отключения ВВ
U_n	10000	В	Номинальное напряжение
$Freq$	50	Hz	Частота

Результаты моделирования, представленные на рис. 2–5, позволили рассчитать отключающую способность для контактов AMF и RMF.

Отключающая способность контактной системы с аксиальным магнитным полем. На рис. 2 представлено распределение аксиальной составляющей магнитного потока на поверхности контакта с аксиальным магнитным полем. На рис. 3 приведён график распределения аксиальной составляющей магнитного потока вдоль поверхности контакта, который будет использован при определении отключающей способности.

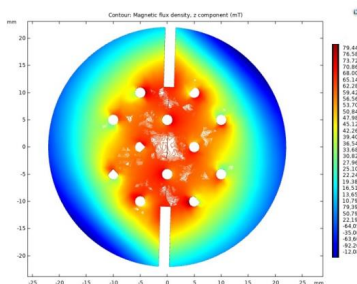


Рис.2. Аксиальная составляющая индукции магнитного поля

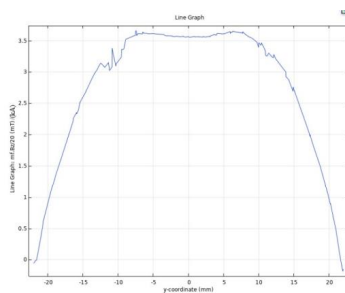


Рис.3. Распределение удельной продольной составляющей индукции магнитного поля в середине межконтактного промежутка

Ток отключения в случае контактной системы АМГ можно определить по следующей формуле [4]:

$$I_{\text{откл}} = k \cdot D^2 \cdot B_z^\alpha, \quad (1)$$

где $k=6,12$ – коэффициент формы контактов, D – диаметр контактов (в мм), B_z – удельная аксиальная составляющая индукции магнитного поля (в мТл/кА), $\alpha=0,4$ – коэффициент мощности.

Удельная индукция определяется как отношение индукции к величине отключаемого тока. Для контактных систем с аксиальным магнитным полем дуга располагается в области, где удельная индукция больше 3,5-4,0 мТл/кА. Для приведённого ранее распределения (см. рис. 3) примем среднее значение удельной составляющей индукции: 3,65 мТл/кА.

Тогда:

$$I_{\text{откл}} = k \cdot D^2 \cdot B_z^\alpha = 6,12 \cdot 46^2 \cdot 3,65^{0,4} = 21,55 \text{ кА}.$$

Таким образом, отключающая способность выключателя с контактной системой АМГ, полученная в ходе математического моделирования, равна 21,55 кА.

Отключающая способность контактной системы с радиальным магнитным полем. Для определения отключающей способности воспользуемся формулой, полученной в результате опытов по определению влияния ширины зазоров на силу Ампера [5]:

$$F_A = 0,5 \cdot I \cdot d \cdot B, \quad (2)$$

где I – отключаемый ток, B – значение индукции плотности магнитного поля, d – расстояние между контактами.

Отсюда формула для определения тока:

$$I_{\text{откл}} = \frac{F_A}{0,5 \cdot d \cdot B}. \quad (3)$$

Значение силы Ампера, действующей на дугу, определяется из результатов моделирования.

На рис. 4 показан вектор силы Лоренца, которая представляет собой удельную силу, т.е. силу, действующую на единичный объем. Чтобы узнать значение силы Ампера, действующей на дугу, нужно умножить силу Лоренца на объём цилиндра с радиусом 2 мм и высотой 5 мм, который при моделировании имитировал дугу:

$$F_A = F_L \cdot V_{\text{ц}} = F_L \cdot \pi r^2 h = 2,46 \cdot 10^9 \cdot 3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3}) \cdot 5 \cdot 10^{-3} = 154 \text{ Н}.$$

Для определения значения магнитной индукции использовалась картина поля, полученного в результате моделирования (рис. 5).

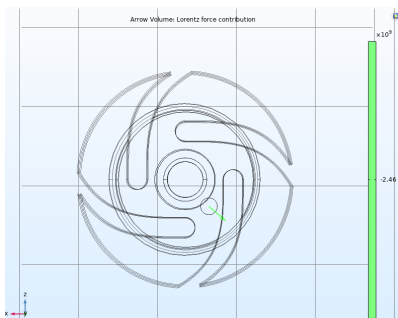


Рис. 4. Вектор силы Лоренца

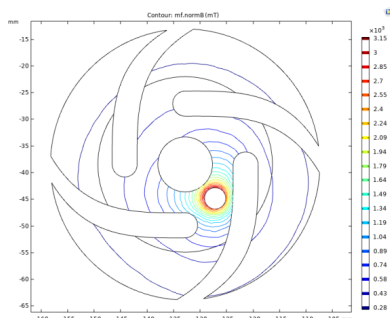


Рис.5 Распределение индукции магнитного поля на поверхности контакта

Тогда ток отключения контактной системы с радиальным магнитным полем:

$$I_{\text{откл}} = \frac{F_A}{0,5 \cdot d \cdot B} = \frac{154}{0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 3,15} = 18,56 \text{ кА.}$$

Таким образом, в результате моделирования получены значения отключающей способности для двух контактных систем с одинаковыми геометрическими параметрами (диаметр электродов, расстояние между ними), но с разной формой магнитного поля. Для контактной системы с аксиальным магнитным полем значение $I_{\text{откл}} = 21,55 \text{ кА}$, а для контактной системы с радиальным магнитным полем $I_{\text{откл}} = 18,56 \text{ кА}$.

На основании полученных результатов можно сделать вывод, что наиболее предпочтительным для работы вакуумного выключателя 10 кВ, 20 кА будет выбор конфигурации контактов с аксиальным магнитным полем. Кроме того, учитывая, что в выбранной контактной системе дуга имеет диффузионный характер, нагрев контактов будет происходить менее интенсивно, что, приводит к меньшей эрозии контактов, что, в свою очередь, увеличивает срок службы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Chaly, A.M. High-current vacuum arc in a strong axial magnetic field / A.M. Chaly, A.A. Logatchev, K.K. Zabello, S.M. Shkol'nik // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2007. – Т. 35. – № 4. – С. 939-945.
2. Забелло, К.К. Характеристики статистического распределения тока, пропускаемого катодным пятном вакуумной дуги, в магнитных полях различной ориентации / К.К. Забелло, А.А. Логачёв, А.М. Чалый, С.М. Школьник // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 6. – С. 58-66.
3. Chaly, A.M. Low-current vacuum arcs with short arc length in magnetic fields of different orientations: a review / A.M. Chaly, S.M. Shkol'nik // IEEE Transactions on Plasma Science. – 2011. – Т. 39. – № 6 PART 1. – С. 1311-1318.
4. Liu, Z. An Interrupting Capacity Model of Axial Magnetic Field Vacuum Interrupters with Slot Type Contacts/ Z. Liu, S. Cheng, X. Zhang, J. Wang, Q. Wang and G. He // 2006 International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum. – 2006. С. 297-300.
5. Муллин, В.В. Оценка скорости перемещения дуги в вакуумных дугогасительных камерах с поперечным магнитным полем/ В.В. Муллин, М.А. Фурсаев. – Вестник СГТУ. – 2012. – № 2 (66). – Вып. 2. – С. 136-138.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КРУ И ИХ ОСОБЕННОСТИ

В связи с ежедневным ростом потребности различных отраслей современной инфраструктуры и рядовых потребителей в электроэнергии и существенной застройкой в крупных городах, все большее распространение получают более современные и практичные виды распределительных устройств. На замену открытым распределительным устройствам приходят комплектные распределительные устройства, монтируемые в виде готовых шкафов, состоящих из типовых унифицированных блоков высокой степени готовности, собранных в заводских условиях, а также герметичных камерах, заполненных изоляционным материалом. Современные устройства до 35 кВ используют в качестве изоляции воздух, свыше – элегаз или вакуум.

Комплектные распределительные устройства могут использоваться как для внутренней, так и для наружной установки (в этом случае их называют КРУН) [1, 2]. В связи с этим, как на высоких, так и на низких классах напряжения возможны оба способа расположения.

На рис. 1 представлено типовое КРУЭ напряжением 110 кВ.

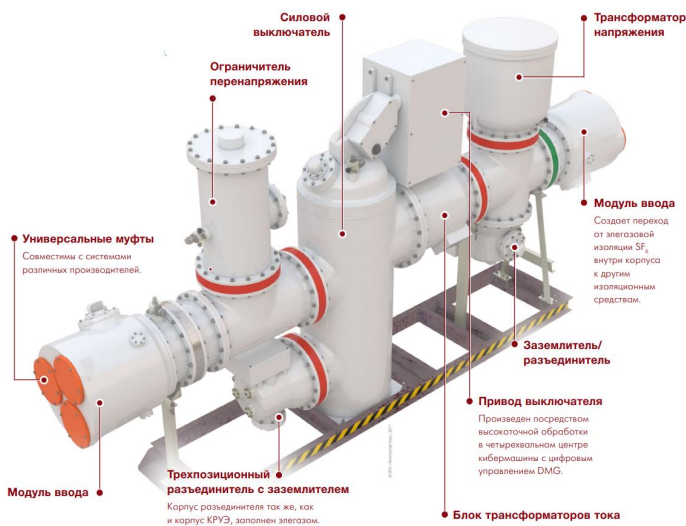


Рис. 1. КРУЭ 110 кВ с обозначением рабочих частей

В электроэнергетике всего мира и России [3] в частности, КРУ выполняют и монтируют по-разному: по типу вводных и отходящих линий, по назначению, по типополнению, по типу установки, по величине номинального тока, по конструктивному исполнению видимого разрыва.

В соответствии с представленной выше информацией видны возможности для развития данной технологии, а также недостатки существующих устройств, которые нужно исследовать и устранять. Вакуумные устройства имеют более высокий ресурс коммутации и

подходят для частых коммутаций, в то время как элегазовые установки применяются для работы в цепях электродвигателей с ограниченной мощностью. В связи с этим ведутся разработки в области внедрения все большего числа вакуумных КРУ взамен элегазовым [4].

В дополнение элегаз является парниковым газом и неизбежные его утечки на объектах электроэнергетики ведут к ухудшению экологической обстановки. Среди новых разработок наиболее перспективной является применение газа на основе фторкетона. Его диэлектрические свойства схожи с SF₆, но при этом он не наносит столь значимого вреда.

Рассматривая материалы, используемые в качестве проводящих, заметно, что медь является достаточно дорогой. В качестве заменителя можно использовать алюминий. Сравнивая эти проводники, видна экономическая целесообразность использования второго из этих двух металлов. Их массы при сходной проводимости отличаются приблизительно на 8%, а диаметры на 25%, но при этом медь дороже алюминия в 3 раза, поэтому увеличенная масса и размеры компенсируются низкой ценой. Сравнивая их электропроводность и стойкость по нагреву видно, что алюминиевые сборные шины и другие токоведущие части проводят меньше: Al – 38·10⁶ См/м, Cu – 59,5·10⁶ См/м, но при этом способны выдержать схожий нагрев при длительной работе.

Если взять за основу КРУЭ 110 кВ и вместо медных токоведущих частей установить алюминиевые, то достичь подобных существующим ячейкам характеристик будет возможно, и при этом незначительно возрастет занимаемое ячейкой пространство. За счет увеличения размера модулей ввода и шинного отсека примерно на 58%. При этом возрастет окупаемость каждой ячейки в несколько раз, упростится транспортировка и сбор самих ячеек, за счет близости производящих мощностей, а также появится возможность создать новые рабочие места. Потери в проводящих свойствах не произойдет. Так же в комбинации с таким решением возможна замена элегаза новым видом изоляционной среды на его основе, но с меньшим показателем глобального загрязнения и схожими диэлектрическими свойствами. Это позволит уменьшить существенные риски, связанные с существующими проблемами утечки элегаза.

Среди явных преимуществ КРУ по сравнению с ОРУ отмечаются:

- Сейсмостойкость, которая позволяет расширить районирование применения комплектных устройств, развитие данной области необходимо для предупреждения неисправностей в сейсмоопасных районах;
- Простота монтажа, позволяющая в краткие сроки вводить новые подстанции в работу и повышать скорость развития смежных отраслей;
- Низкие эксплуатационные расходы, которые позволяют повысить окупаемость нововведенного оборудования;
- Низкие уровни шума.

Исходя из этого очевидно, что необходимо в ближайшее время развивать и усовершенствовать вакуумную часть КРУ, что позволит отключать большие токи КЗ и повысить ресурс станций в целом. Вводить более практичные материалы для проводящих частей как токопроводов, так и других элементов внутреннего содержания шкафов и камер.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рожкова Л. Д., Козулин В. С. Электрооборудование станций и подстанций: Учебник для техникумов. — М.: Энергоатомиздат, 1987.
2. Неклепаев Б. Н., Крючков И. П. Электрическая часть станций и подстанций. — М.: Энергоатомиздат, 1989.
3. ПУЭ 7. Правила устройства электроустановок. Издание 7.
4. Комплектные распределительные устройства специального назначения 198250 [Электронный ресурс] / Е.Г. Акимов. — : [Б.и.]. — 1 с. — Режим доступа: <https://rucont.ru/efd/191685>

ПОВЫШЕНИЕ ОТКЛЮЧАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ МУЛЬТИКАМЕРНЫХ
РАЗРЯДНИКОВ

В настоящее время на подстанциях используется устаревшее оборудование со сниженным уровнем изоляции, требующее замены. В то же время устройства для защиты от пробоя изоляции при перенапряжениях также устарели или не справляются с нагрузкой ввиду увеличения и расширения сети [1, 2].

На данный момент на подстанциях и закрытых РУ устанавливаются ограничители в том числе мультикамерные разрядники (РМК – см. рис. 1). РМК обладает рядом недостатков. Первый – наличие проблемы внешнего перекрытия МКС из-за нарушения электрической прочности в плазменном выхлопе. Это происходит из-за того, что при срабатывании МКС одновременно из каждого канала вырывается столб электропроводящей плазмы, что может спровоцировать перекрытие соседних каналов вдоль аппарата. Второй – возникновение открытой дуги разрядника при срабатывании (рис. 2). Во время работы из разрядных промежутков вырывается столб плазмы, отдавая тепло в окружающую среду, из-за чего нет возможности установить такой разрядник в замкнутом помещении.

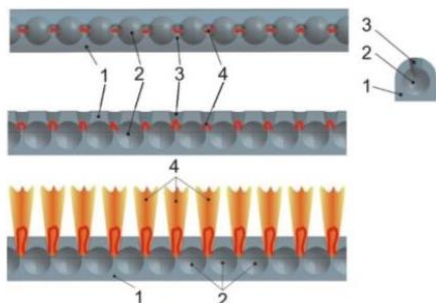


Рис. 1. Устройство мультикамерного разрядника:
1 – силиконовая резина, 2 – электроды, 3 –
воздушный промежуток, 4 – канал разряда

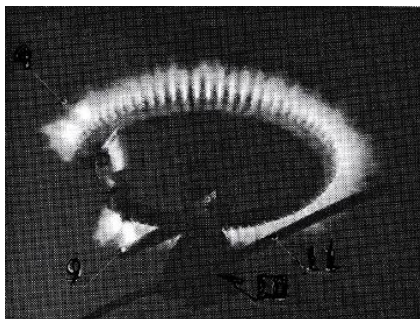


Рис. 2. Мультикамерный разрядник во время
работы

Цель данного эксперимента – рассмотреть возможность модернизации РМК путем замены дугогасящей среды на другую, для этого необходимо провести ряд испытаний и измерений. Испытания проводились, используя генератор импульсных напряжений, приборы для измерения параметров разрядника. Для решения данных проблем в работе [3] был проведен эксперимент по изменению дугогасящей среды, путем заполнения газоразрядных камер в МКС элегазом.

В результате уменьшился столб дуги (рис. 3, 4), что свидетельствует о увеличении сопротивления разрядника и подтвердились выводы о том, что изменение среды, в которой горит дуга благотворно скажется на дугогасящей способности устройства.

Для того, чтобы газоразрядные камеры остались герметичными после срабатывания разрядника в полевых условиях, предложена конструкция, позволяющая заполнить систему элегазом, а при работе избыточное давление будет удерживать оболочка, которая будет

выполнять функцию расширительного бака и при небольшой величине дуги не будет повреждаться во время срабатывания МКС (рис. 4).

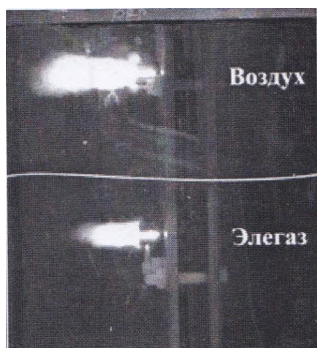


Рис. 3. Испытания РМК-20 при заполнении 10-ти газоразрядных камер водой (слева), 20-ти газоразрядных камер (справа)

В результате анализа испытаний найдена возможность для глубокой модернизации разрядника типа РМК, путем замены дугогасящей среды и такого изменения конструкции, которое позволит содержать элегаз внутри устройства герметично, и выдерживать создающееся давление в камерах.

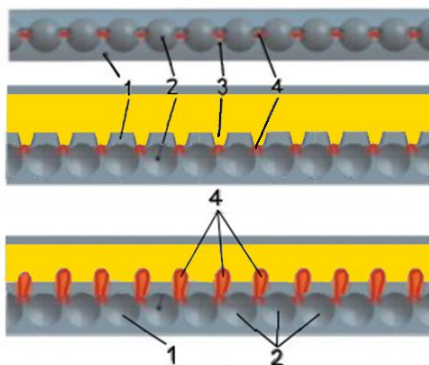


Рис 4. Предлагаемый вариант конструкции МКС. 1 – силиконовая резина, 2 – электроды, 3 – элегаз, 4 – канал разряда.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Казаков Ю.Б., Фролов В.Я., Коротков А.В. Статистический метод оценки энергетической эффективности работы трансформаторов городских сетей// Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2013. № 5. С. 51-53.
2. Коротков А.В., Фролов В.Я. Методы оценки характеристик оборудования электротехнических комплексов городских распределительных сетей// Электрика. 2014. № 1. С. 06-10.
3. Г. В. Подпоркин, Е. В. Вечирко. Повышение дугогасящей способности мультикамерных разрядников при помощи воды// V Конференция по молниезащите. 2016. С 249-257.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНОГО ТРЕКЕРА

Введение. В связи с ростом применения солнечных панелей встает вопрос о увеличении эффективности данного метода выработки электроэнергии. Одним из наиболее успешных способов повышения КПД панелей является использование автоматической поворотной конструкции для солнечных батарей (солнечные трекеры).

Цель работы. Провести сравнительный анализ трекерных солнечных систем, проанализировать различные способы повышения эффективности солнечных панелей.

Актуальность. В связи с ограниченностью традиционных ресурсов и экологическими проблемами в последние годы большую популярность набирает использование возобновляемых источников электроэнергии. Одним из таких источников является солнечная энергетика. Использование солнечных батарей помогает решить проблему, связанную с электросбережением, уменьшить воздействие вредных выбросов в окружающую среду и тем самым улучшить экологическую обстановку.

Несмотря на значительные успехи в генерации солнечной электроэнергии, способы повышения эффективности до сих пор окончательно не изучены. Можно выделить следующие факторы, влияющие на снижение КПД фотоэлементов [1]:

1. Отражение излучения, падающего на поверхность солнечного модуля.
2. Затенение поверхности фотоэлементов контактной сеткой.
3. Высокая температура солнечного элемента приводит к спаду напряжения.

Данные неблагоприятные влияния на солнечный модуль можно устранить несколькими способами. Один из способов повышения эффективности солнечных панелей заключается в использовании технологии концентрированной солнечной энергии [2]. С помощью солнечного концентратора происходит фокусировка лучей на солнечной батарее. Другой способ повышения эффективности солнечных панелей заключается в использовании специального покрытия, которое позволяет элементам солнечной панели самостоятельно охлаждаться.

Максимальная энергия будет вырабатываться в том случае, когда солнечные лучи направлены под углом 90 градусов на плоскость батареи [3]. В обратном случае эффективность снижается в разы. В связи с этим, одним из наиболее эффективных способов повышения КПД панелей является использование автоматической поворотной конструкции для солнечных батарей (солнечные трекеры) [4].

Составляющие, необходимые при проведении экспериментов: Arduino Uno, сервопривод S3003 6В, сопротивления 12 кОм и 30 кОм, фоторезисторы GL5528, сопротивление 10-20 кОм, солнечная панель из 14 кремниевых прямоугольных элементов размером 40×20мм [5].

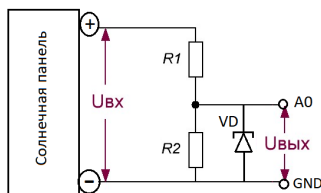


Рис. 1. Схема подключения солнечной панели к делителю напряжения

Для того, чтобы с помощью микроконтроллера проводить измерения напряжения, выдаваемого солнечной панелью без нагрузки, необходимо применить делитель напряжения (voltage divider). Подключение аналогового входа и солнечной панели показано на рис. 1.

$$\frac{U_{вх}}{R_1 + R_2} = \frac{U_{вых}}{R_2} = I \quad (1)$$

Подбираем сопротивления для делителя напряжения из учета заданных значений напряжения $U_{вх}=7$ В; $U_{вых}=5$ В и неравенства:

$$0,5 \text{ Вт} \geq I^2(R_1 + R_2) \quad (2)$$

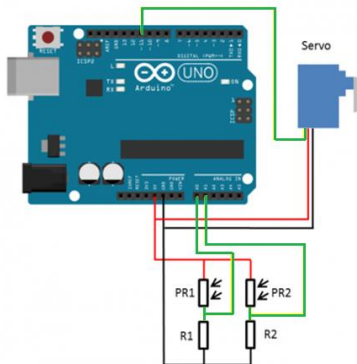


Рис. 2. Схема соединения солнечного трекера

Используемый контроллер Arduino периодически считывает значения с двух датчиков и сравнивает их (рис. 2). Когда значения с датчиков одинаковы – панель наведена на солнце. В случае различных показаний контроллер дает команду на сервопривод для поворота платформы. Команда на привод подается до тех пор, пока значения с датчиков не сравняются.

Было произведено 8 измерений в одно и то же время дня для трековой и безтрековой системы в диапазоне с 8-00 по 19-00.

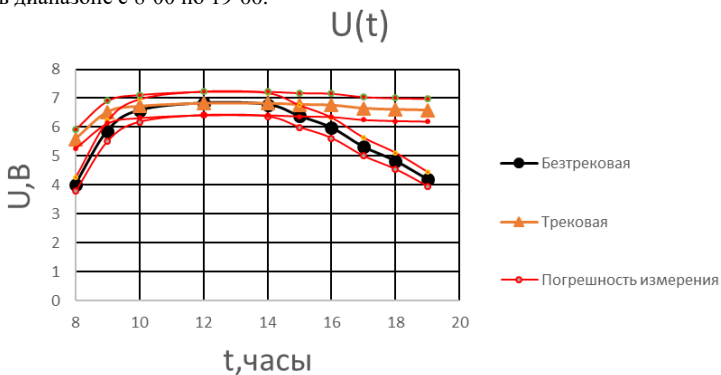


Рис. 3. График изменения напряжения в зависимости от времени двух систем с погрешностью измерения

По графику $U(t)$ с погрешностью на рис. 3 можем сделать вывод о том, что в период времени с 10 до 16 часов отклонение трековой и безтрековой системы не являются существенными с учетом погрешности. В период с 8 до 10 и с 16 до 19 часов отклонение двух систем значительно. В данные временные промежутки система с трекером имеет более высокую эффективность.

Выводы. На этапе определения способа реализации солнечных трековых панелей было обнаружено то, что использование современных технологий не всегда целесообразно. Так, применение простых фоторезисторов для данной задачи (отслеживание местоположения солнца) оказалось таким же эффективным, как использование сложных устройств с GPS навигацией. Было установлено то, что применение трекера, даже с одним сервоприводом, повышает эффективность солнечной панели на 12%. В заключении следует подчеркнуть то, что существует множество способов повышения эффективности солнечных панелей. Наиболее целесообразным оказалось применение трековых систем слежения за солнцем.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Approaches, Methods and Tools for Solar Energy in Urban Planning. Marja Lundgren, Johan Dahlberg 2018. -34 с.
2. Алхасов, А. Б. Возобновляемая энергетика : / А. Б. Алхасов ; под ред. В. Е. Фортова. – Москва : ФИЗМАТЛИТ -7 с.
3. Б.В. Лукутин, И.О. Муравлев, И.А. Плотников. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями, 2015 -81 с.
4. Фортов В.Е., Макаров А.А. Направления инновационного развития энергетики мира и России // Успехи физических наук , 2009. -19 с.
5. В.В. Бессель, В.Г.Кучеров, Р.Д. Мингалеева. Изучение солнечных фотоэлектрических элементов, 2014. -30с.

УДК 537.523.5

А.А. Рогожина¹, А.Н. Чусов², И.С. Савельева¹, С.Ю. Грачев¹
¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
²АО «НПО «Стример»

РАЗРАБОТКА И ВАЛИДАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДУГОВОГО РАЗРЯДА В МУЛЬТИКАМЕРНОМ РАЗРЯДНИКЕ

Введение. Мультикамерные разрядники (РМК) являются эффективным средством защиты линий электропередачи от грозовых перенапряжений. Основным элементом конструкции РМК является мультикамерная система (МКС) – система электродов, последовательно расположенных в выполненном из силиконовой резины образце с специально сформированными соплами напротив каждого искрового промежутка. Принцип работы РМК можно описать следующим образом: в нормальном режиме работы сети устройство функционирует как изолятор. При грозовом перенапряжении в каждой разрядной камере происходит пробой, что приводит к протеканию импульсного тока молнии. Вызванное большим давлением внутри газа и действием силы Лоренца истечение плазмы из камеры приводит к прерыванию тока и гашению разряда. Экспериментальным путём было установлено, что использование определённых конструкций позволяет повысить эффективность прерывания тока короткого замыкания.

Цель данного исследования – определить зависимость эффективности прерывания тока сети в РМК от конструкции устройства, используя экспериментальные и теоретические методы исследования. Для экспериментального исследования эффективности работы РМК

необходимо в лабораторных условиях воспроизвести воздействия грозových перенапряжений. Для этой цели используется специально разработанная установка, состоящая из двух частей: генератор импульсов тока и напряжения, имитирующий воздействие молнии, и колебательный контур, имитирующий воздействие сети. При проведении испытаний РМК устанавливался параллельно с генератором и контуром. Испытания проводятся по следующей процедуре: сначала колебательный контур и генератор заряжаются до определённого напряжения; затем вручную осуществляется пробой одного из искровых промежутков. Таким образом импульс грозového перенапряжения и переменное напряжение сети прикладываются к устройству одновременно. В РМК процесс гашения дуги протекает по следующему сценарию: ток сети успевает протечь в течении полупериода и обрывается в нуле.

Моделирование искрового разряда. Основные уравнения. Горение разряда описывается уравнениями Навье-Стокса для сжимаемого газа и уравнениями Максвелла. Система уравнений Навье-Стокса состоит из уравнений переноса вещества, импульса и энергии:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}), \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\nabla p + \nabla \tau + [\vec{j} \times \vec{B}], \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h \vec{u}) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\tau \vec{u}) + \vec{j} \cdot \vec{E} + \nabla \cdot (\vec{q} + \vec{q}_{rad}). \quad (3)$$

Здесь ρ обозначает плотность плазмы, \vec{u} – скорость газа, \vec{j} – плотность тока, \vec{B} – вектор магнитной индукции, p – давление, τ – тензор вязкости, h – энтальпию, \vec{q} – поток тепла, определяемый теплопроводностью, \vec{q}_{rad} – поток излучения, а μ_0 – магнитная постоянная. Влияние турбулентности учитывалось с помощью к-ε модели [1 – 3]. Для того, чтобы замкнуть систему уравнений, необходимо добавить уравнения состояния:

$$\rho = \rho(T, p), \quad (4)$$

$$h = h(T, p), \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0, \quad (6)$$

$$[\nabla \times \vec{B}] = \mu_0 \vec{j}. \quad (7)$$

Также необходимы зависимости от температуры и давления для вязкости, теплопроводности и электрической проводимости.

На границе верхнего электрода задавался импульсный ток 10 кА, нижний электрод был заземлён. На контуре, ограничивающем воздушный объём, задавалось условие Outlet, соответствующее открытой границе. Так как в рамках данной задачи не рассматривалась фаза электрического пробоя, начальная проводимость искрового промежутка определялась заданным заранее нагретым до температуры 10000 К каналом, соединяющим электроды. Давление в воздушном объёме в начальный момент распределено равномерно и равно атмосферному, температура воздуха равна 293 К (кроме канала).

Необходимые расчеты и моделирование производилось с использованием программного обеспечения Comsol Multiphysics.

Валидация модели импульсной дуги. Для проверки достоверности разработанной математической модели дуги были использованы результаты исследования разряда в искровом промежутке (рис. 1). Так как искровой промежуток можно считать самой простой, вырожденной формой разрядной камеры, данные результаты можно считать опорными для последующего анализа. С точки зрения моделирования разряд описание разряда в такой геометрии представляется сравнительно простым, так как позволяет постановку осесимметричной задачи. На рис. 2 представлена геометрия задачи: искровой промежуток, начальный дуговой канал и воздушный объём. В качестве входных данных использовался импульсный ток 10 кА (рис. 3): экспериментальная кривая аппроксимировалась аналитической функцией, которая впоследствии использовалась при постановке граничных условий. На выходе расчёта – падение напряжения на дуге. Сравнение результатов расчёта с экспериментальными данными приведено на рис. 4, две расчётные кривые соответствуют модели, учитывающей турбулентность, и не учитывающей.

Так как используемая модель не позволяет описывать проращение стримера, примерно до 20-ой микросекунды наблюдается существенное расхождение, так как на этом участке экспериментальной кривой как раз наблюдается резкий перепад напряжения, соответствующий пробою. На более поздней стадии разряда, когда уже сформировался проводящий канал и кривая соответствует падению напряжения на дуге, совпадение становится довольно хорошим.



Рис. 1. Искровой промежуток

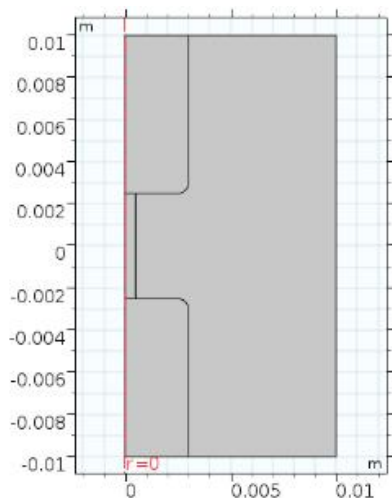


Рис. 2. Расчётная область для моделирования дуги в искровом промежутке

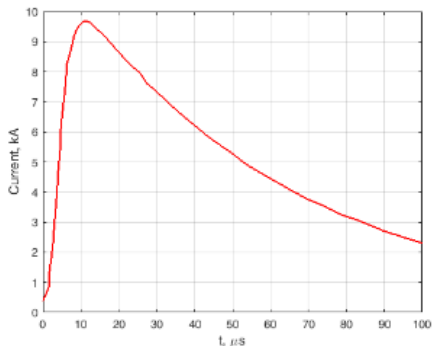


Рис. 3. Импульс тока 10 кА, использовавшийся в расчётах

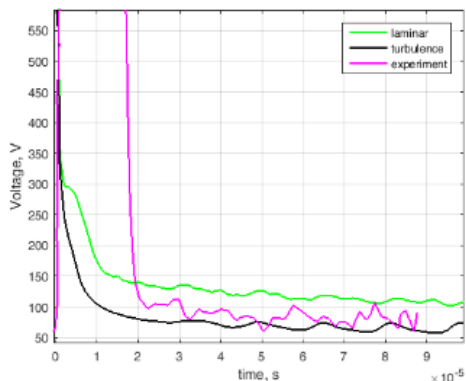


Рис. 4. Сравнение расчётного напряжения с экспериментальным

Выводы. Разработанная модель искрового разряда в РМК позволила получить результаты достаточно хорошо согласующиеся с экспериментальными данными, что видно из сравнения данных на рис. 4. Этот результат позволяет с оптимизмом смотреть на перспективы применения моделирования для проектирования устройств молниезащиты.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Advances in low-voltage circuit breaker modelling / B. Swierczynski, J. J. Gonzalez, P. Teulet [etc.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2004. – 37(4) p. 595-609.
2. Low-voltage circuit breaker arcs simulation and measurements / Fei Yang, Yi Wu, MingZhe Rong [etc.] // Journal of Physics D: Applied Physics. – 2013. – 46 (27):273001.
3. Versteeg, H. K. Computational Fluid Dynamics/ H. K. Versteeg, W Malalasekera. – 2nd edition – Harlow: Prentice Hall: 2002. – 517 p.

УДК 621.316.71

А.В. Ставицкий
Санкт-Петербургский горный университет

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И АВТОМАТИКИ ВЕНТИЛЯТОРА ГЛАВНОГО ПРОВЕТРИВАНИЯ

Актуальность. Масштаб добычи полезных ископаемых постоянно растет. Это приводит к увеличению снабжения рабочих зон свежим воздухом. Использование систем автоматического управления в вентиляторах главного проветривания позволит увеличить их надежность, а также справиться со сложными задачами, соблюдая все требования к безопасности ведения горных работ.

Цель и задачи работы – разработка системы автоматического управления (САУ) электропривода вентилятора главного проветривания (ВГП), позволяющая повысить эффективность производства.

Для расчета САУ была составлена структурная схема (рис. 1), на которой представлены два контура: регулирования токов и скорости. В состав токового контура входят передаточные функции электромагнитной составляющей (ЭМ), регулятора тока (РТ),

преобразователя частоты (ПЧ) и датчика тока (ДТ). Данный блок вычисляет ток, который необходимо подвести к статору двигателя для получения заданной скорости. Передаточные функции регулятора скорости (РС), датчика скорости (ДС) и механической части электродвигателя (МЭХ) относятся к внешнему контуру (скорости).

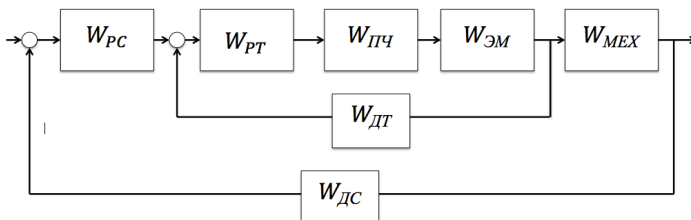


Рис. 1. Структурная схема САУ

Для контура регулирования токов требуется обеспечить быстродействие и отсутствие статической ошибки, исходя из этого, был выбран ПИ-регулятор [1]. Для датчиков передаточные функции будут равны их коэффициенту усиления, но при моделировании для простоты примем их равными единице:

$$W_{ДС} = K_{ДС} = W_{ДТ} = K_{ДТ} = 1,$$

$$W_{ПЧ} = \frac{K_{ПЧ}}{T_{ПЧ}p + 1}, \quad W_{ЭМ} = \frac{K_{ЭМ}}{T_{ЭМ}p + 1},$$

$$W_{МЭХ} = \frac{K_{МЭХ}}{T_{МЭХ}p + 1}, \quad W_{PT} = \frac{K_{рег1}(T_{u1}p + 1)}{T_{u1}p + 1},$$

$$W_{PC} = \frac{K_{рег2}(T_{u2}p + 1)}{T_{u2}p + 1},$$

где W – передаточная функция, T – постоянная времени, K – коэффициент усиления, а p – оператор Лапласа.

Произведя расчет параметров данных передаточных функций, были получены следующие значения: $K_{ПЧ} = 1$; $T_{ПЧ} = 0,01$; $K_{ЭМ} = 1,75$; $T_{ЭМ} = 0,035$; $K_{МЭХ} = 1$; $T_{МЭХ} = 0,099$; $K_{рег1} = 1$; $K_{рег2} = 0,165$; $T_{u1} = 0,035$; $T_{u2} = 0,099$.

Моделирование САУ проводилось в пакете прикладных программ Matlab Simulink [2]. Было выбрано частотное управление двигателя переменного тока, так как оно является экономичным, поскольку позволяет сохранить высокий к.п.д. двигателя, обеспечивает как двигательные, так и тормозные режимы работы, хорошую жесткость характеристик и, что самое главное, позволяет использовать в качестве приводного асинхронный короткозамкнутый двигатель.

Схема реализации данной модели двигателя представлена на рис. 2. В ней присутствуют: блок регулирования токов, блок контроля скорости, блок задатчика интенсивности (играет роль сигнала от системы управления, контролирующей плавность пуска двигателя), блок системы импульсно-фазового управления (имитирует систему управления тиристорным преобразователем.).

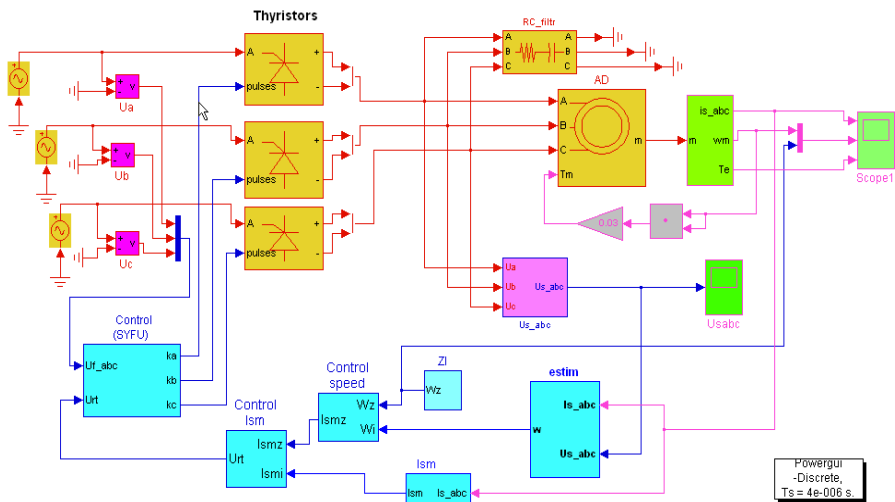


Рис. 2. Структурная схема асинхронного двигателя вентилятора главного проветривания с преобразователем частоты

Рассматриваемый асинхронный двигатель имеет вентиляторную нагрузку [3]. Для начала рассмотрим процесс пуска двигателя «напрямую» на рис. 3. Здесь мы наблюдаем бросок тока в начальный момент равный порядку почти 400 А, а также постепенный разгон двигателя за время приблизительно равное 4,5 секундам. Благодаря тиристорному устройству, пуск двигателя происходил плавно в течение 5 секунд [4]. Величина пускового тока уменьшилась и стала равна 180 А. Нет броска тока в начальный момент. Результаты моделирования на рис. 4.

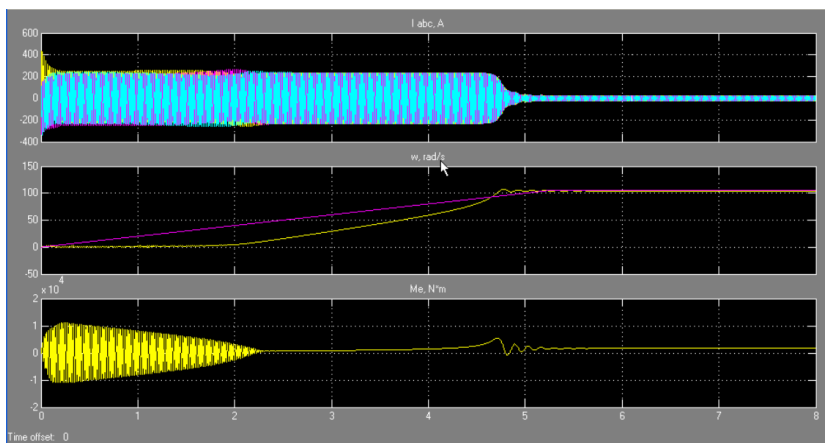


Рис. 3. Результаты моделирования прямого пуска

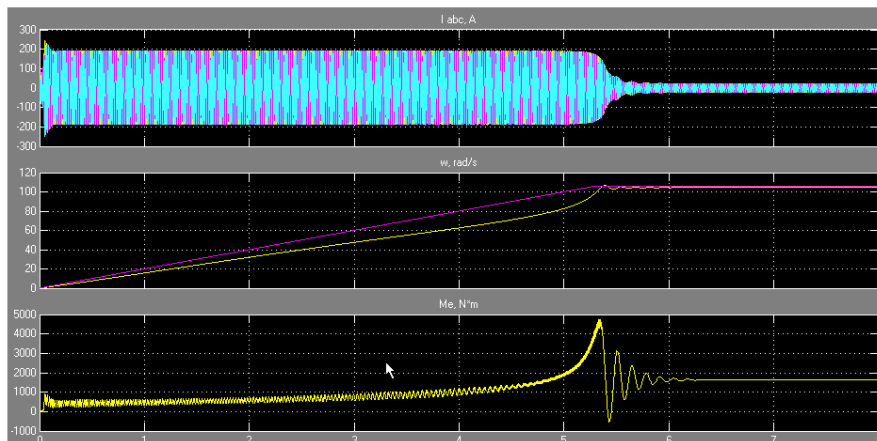


Рис. 4. Пуск двигателя при использовании тиристорного пускового устройства

Все эти плюсы влияют на эксплуатационную надежность оборудования, как электрического, так и механического; увеличивается срок службы, а также эксплуатационные характеристики.

Вывод: Применение САУ в электроприводе ВГП позволяет сократить потребление энергии за счет оптимизации режима работы вентиляторной установки, а также увеличить надежность работы за счет применения средств контроля и автоматизации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Иващенко Н. Н. Автоматическое регулирование. Теория и элементы систем. – М.: Машиностроение, 1978.
2. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс, 2007.
3. Бабак Г.А., Бочаров К.П., Волохов А.Т. и др. Шахтные вентиляторные установки главного проветривания. – М.: Недра, 1982.
4. Мэрфи Дж. Тиристорное управление двигателями переменного тока: Пер. с англ. — М.: Энергия, 1979.

УДК 621.311.4-52

Ж. Мукашева, В.З. Стошич, К.Д. Тарасов, В.Я. Фролов
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА КОНЦЕПЦИИ ЦИФРОВОЙ ПОДСТАНЦИИ 110 КВ

В настоящее время энергетическая сфера России претерпевает существенные изменения, связанные с внедрением автоматики в энергетические системы. Таким образом, появляется новый тип подстанций, который называется – цифровая подстанция (ЦП). Это подстанция с высоким уровнем автоматизации, в которой процессы информационного обмена между ее элементами, а также управление работой подстанции осуществляются в цифровом виде.

Структура цифровой подстанции включает в себя три уровня: уровень процесса, уровень присоединения и подстанционный уровень. Передача информации между устройствами уровня процесса и уровня присоединения, а также между различными устройствами уровня присоединения, осуществляется с помощью шины процесса. Обмен данными на уровне подстанции, а также от устройств уровня присоединения к устройствам уровня подстанции, осуществляется с помощью шины подстанции.

В зависимости от используемого оборудования и связи между уровнями существует три типа концепции ЦП.

Рассмотрим каждый тип в отдельности.

Первый тип (см. рис. 1) представляет собой традиционную подстанцию, за исключением того, что связь между устройствами уровня присоединения и между уровнем присоединения и уровнем станции осуществляется с помощью протоколов стандарта МЭК 61850 [1].

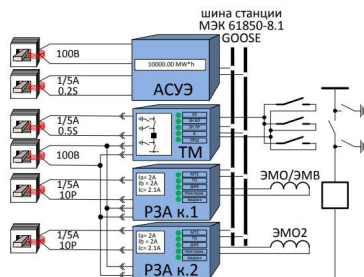


Рис. 1. Архитектура №1 ЦП

Преимущества данного типа: исключение кибератак, так как в большинстве случаев используются медные провода; наличие опыта эксплуатации традиционных трансформаторов тока и напряжения.

Недостатки: большое количество медных кабелей, что ведёт к большим затратам; не исключает ошибочных действий персонала; наличие метрологических потерь во вторичных цепях из-за конструктивных особенностей измерительных трансформаторов.

Второй тип подстанций (см. рис. 2) отличается от первого тем, что связь между оборудованием уровня процесса и уровня присоединения осуществляется на основе MMS-сообщений [2].

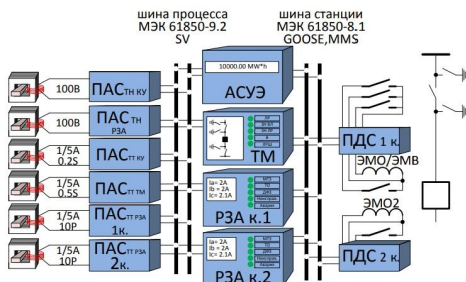


Рис. 2. Архитектура №2 ЦП

Преимущество данного типа: наличие опыта эксплуатации традиционных трансформаторов тока и напряжения; меньшее количество медных кабелей, что ведёт к

уменьшению затрат; наличие метрологических потерь во вторичных цепях из-за конструктивных особенностей измерительных трансформаторов.

Недостатки: использование преобразователей аналогового сигнала (ПАС) и преобразователей дискретного сигнала (ПДС); необходимость квалифицированного обслуживающего персонала; недостаточная информационная безопасность.

Третий тип подстанций – полная цифровизация подстанции (см. рис. 3).

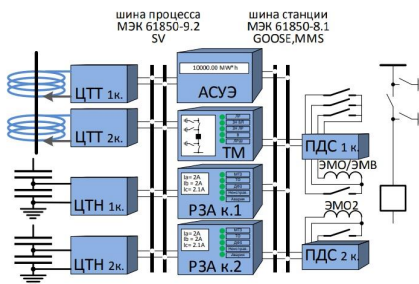


Рис. 3. Архитектура №3 ЦП

Преимущество данного типа: автоматическое управление подстанцией без участия оперативного персонала с АРМ диспетчера – снижение затрат на обслуживание; значительное снижение количества кабельных связей в составе комплекса и их полная диагностируемость, что ускоряет поиск неисправности и сокращает время восстановительного ремонта; сокращение времени поставки и затрат на поставку ЗИП за счет использования вычислительных и коммуникационных средств общего назначения (серверов) в составе системы, которые имеют более низкую стоимость по сравнению со специальными, при более высокой производительности; увеличение точности измерений и увеличение благодаря этому точности учета электроэнергии и точности определения мест повреждения; упрощение вторичных соединений (применение волоконно-оптических кабелей) – снижение затрат на обслуживание, упрощение вопроса электромагнитной совместимости; типизация и автоматизация проектных решений – снижение времени на проектирование; отсутствие электрической связи между первичным и вторичным оборудованием – повышение безопасности [3].

Недостатки: отсутствие единой нормативной базы на проектирование; необходимость квалифицированного обслуживающего персонала; дорогостоящее оборудование; недостаточная информационная безопасность.

Сравнив преимущества и недостатки данных концепций цифровых подстанций, целесообразнее сделать выбор в пользу третьего варианта. Применение выбранного типа умной подстанции позволит коренным образом пересмотреть структуры и средства обеспечения надежности защиты силового оборудования, повысить эффективность и сократить время технического обслуживания оборудования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ Р МЭК 61850-7-1-2009. Сети и системы связи на подстанциях. – Москва: Стандартинформ, 2010.
2. Маслов А. Цифровые подстанции АББ. Преимущества, решения, опыт реализации. / А. Маслов // ООО «АББ Силовые и Автоматизированные Системы» - 2018 г.
3. Громцов С. Цифровая подстанция. / С.Громцов // ПАО «Россети» - 2018 г.

DEFINITION OF INITIATING EVENT CATEGORY APPLYING PRA METHODS

Introduction

The issue of reliability of nuclear power plants was raised from the very beginning of their development [1]. In Russia, probabilistic methods for calculating the reliability of nuclear power plants have been used since the late 60s of the 20th century. Starting with OPB-88/97, the presence of a probabilistic safety analysis was required as part of the design documentation submitted to obtain a license from the Gosatomnadzor of Russia [2].

Fukushima Daiichi accident brought innovations to the process of nuclear power plants design including probabilistic safety assessment. Consideration of external influences entails special requirements for systems, structures and components of a nuclear power plant [3 – 5].

The objective of the current study was the ability of systems, structures and components that provide ultimate heat sink, to perform their functions and to ensure the safety of the nuclear power plant in the event of external hazards that entail the loss of ultimate heat sink. The aim of the study is to estimate frequency of loss of ultimate heat sink applying probabilistic methods.

Methods and Materials

Probabilistic safety analysis is a means of identifying potentially vulnerable aspects in the design and control of nuclear power plant units. It is a complex, comprehensive safety analysis, during which probabilistic models are developed to determine end states with damage to sources of radioactivity and end states of nuclear power plant with exceeding the established limits on emissions of radioactive products and radiation impact on the population and environment, and values of probabilistic safety indicators are determined [6, 7].

Hazards usually associated with loss of ultimate heat sink were taken as initiating events in current study:

- Algae;
- Frazil ice;
- Pack ice;
- Oil spill.

The ultimate heat sink and associated heat transfer systems are designed to remove heat from the reactor in all design operating modes of the plant.

The Baltic Sea water is used as a source of technical water supply and a final heat swallower at considered nuclear power plant. Water lines of cooling water (channels, tunnels) connect the final heat absorber with consumers of sea cooling water of the power unit. All cooling water systems are made according to direct-flow scheme with single circulation of seawater through heat exchange equipment.

The following cooling water systems are accepted for considered NPP:

- Main cooling water system intended for cooling water supply and heat removal to the final absorber from turbine in all normal operation modes;
- Auxiliary cooling water system designed for heat removal to final absorber from equipment not important for safety;
- Cooling water system of essential consumers, which is intended for heat removal to the final absorber from heat exchange equipment of the intermediate circuit system of essential consumers, in all modes of unit operation including extended design modes.

RiskSpectrumPSA was used as a tool for estimating of probabilistic safety values [8, 9]. Systems analysis was accomplished and fault trees were developed for the selected safety features. Following steps were completed during system analysis: Definition of system purpose and PSA-related safety functions; System boundaries definitions; Identification of initial condition of the system for analysis; Appointment of modeling assumptions; Failure modes and effects analysis; Analysis of dependencies and connections with other systems; Human reliability analysis; Common cause failures analysis; Fault tree development. Figure 1 presents fault tree modeling protective measures against algae.

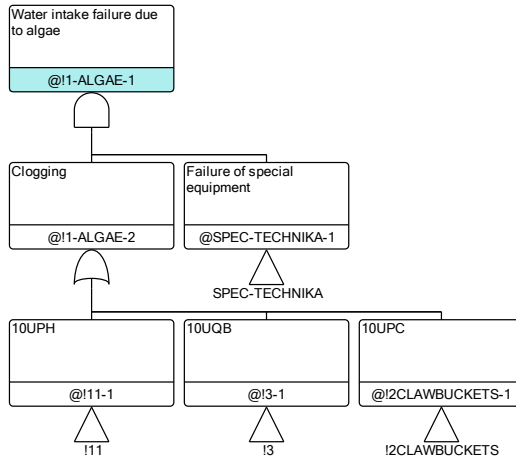


Fig. 1. Fault tree for protective measures against algae

Results

Table 1 contains results of quantification of frequency of loss of ultimate heat sink due to different initiating events.

Table 1. Frequency of loss of ultimate heat sink due to different initiating events

Initiating event	Initiating event frequency (1/year)	Probability of equipment failure	Frequency of loss of ultimate heat sink (1/year)
Algae	$1,05 \cdot 10^{-1}$	$8,64 \cdot 10^{-7}$	$9,07 \cdot 10^{-8}$
Frazil ice	$4,17 \cdot 10^{-2}$	$5,52 \cdot 10^{-6}$	$2,30 \cdot 10^{-7}$
Pack ice	$8,77 \cdot 10^{-3}$	$1,00 \cdot 10^{-7}$	$8,77 \cdot 10^{-10}$
Oil spill	$3,70 \cdot 10^{-5}$	$1,18 \cdot 10^{-2}$	$4,43 \cdot 10^{-7}$

Discussion

In current study design extension conditions connected with external events (DEC-C) are considered. For such events, it is necessary to estimate their frequency of occurrence. Events were assumed belonging to DEC-C if their frequency of occurrence is estimated less than 10^{-5} 1/year.

Conclusion

Analysis of influences of hazards leading to ultimate heat sink on systems of NPP with VVER-1200 reactor was elaborated applying probabilistic methods. Results of the analysis are presented in Table 1. According to results all events can be defined as DEC-C conditions and can be treated as practically eliminated. It means that requirements implemented to such system during design process can be taken as to design extension safety function category.

REFERENCES:

1. An Assessment of Accident Risks in US Commercial Power Plant (Reactor Safety Study) // Rep. WASH-1400. – Washington, DC, 1975 – 72 p.
2. V. Ostreikovskiy, Yu. Shvyryaev, Nuclear power plants safety. Probabilistic analysis, FIZMATLIT, Moscow, 2008– 352 p.
3. N. Chernukha, V. Lalin, A. Birbraer, “Probabilistic justification of dynamic loads on NPP equipment caused by aircraft impact”, Peter the Great St. petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology, 23(04) 2017 -9 p.
4. J. Sorman, O. Backstrom, Luo Yang Method for Analysing Extreme Events. Probabilistic Safety Assessment and Management PSAM 12. Honolulu, 2014 – 9 p.
5. I. Kuzmina, A. Lyubarskiy, P. Hughes The fault Sequence Analysis Method to assis in Evaluation of the Impact of Extreme Events on NPPs. Nordic PSA Conference. Stockholm, 2013 г. – 15 p.
6. Accident Sequence Evaluation Program. Human Reliability Analysis Procedure. NUREG 4772. Albuquerque, NewMexico. 1987 г. – 170 p.
7. Federal Standards and Rules in the Field of Atomic Energy Use “General Safety Provisions for Nuclear Power Plants” (NP 001-15)”, Moscow, 2015– 112 p.
8. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. SSG-3, Vena, 2010– 144 p.
9. Development and Application of Level 2 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. SSG-4, Vena, 2010 – 74 p.

УДК 536.24

А.Ю. Бабич, Э.Р. Зайнуллина, В.В. Сучок
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ТРУБЫ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Введение. Исследованы теплообмен и движение конденсата на внутренней поверхности трубы. Впервые в данной области применены гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГГДТП) [1]. Экспериментальная установка позволяет задавать различные направления для пара и охлаждающей воды, наклонять и поворачивать трубу.

Градиентная теплотметрия успешно применяется в задачах конвективного теплообмена [2, 3] и при мониторинге двигателей внутреннего сгорания [4, 5]. В нашей работе градиентная теплотметрия применяется для изучения конденсации.

Экспериментальная установка. С помощью электроэрозионного станка в трубе были вырезаны сегменты с выборками под ГГДТП и просверлены отверстия под провода датчиков и электроды термопар. ГГДТП устанавливались на изолирующую подложку из слюды толщиной 0,05 мм, а затем крепились эпоксидной смолой заподлицо с внутренней поверхностью трубы. Излишки смолы после затвердевания удалялись, а поверхность шлифовалась. Спай термопары припаивался вблизи ГГДТП, электроды выводились через керамическую соломку. После монтажа ГГДТП и термопары сегмент впаивался обратно в

трубу. Ввиду малой толщины реза электроэрозионного станка уступ на внутренней поверхности не образовывался и течению пленки конденсата не мешал (рисунок 1, а, б).

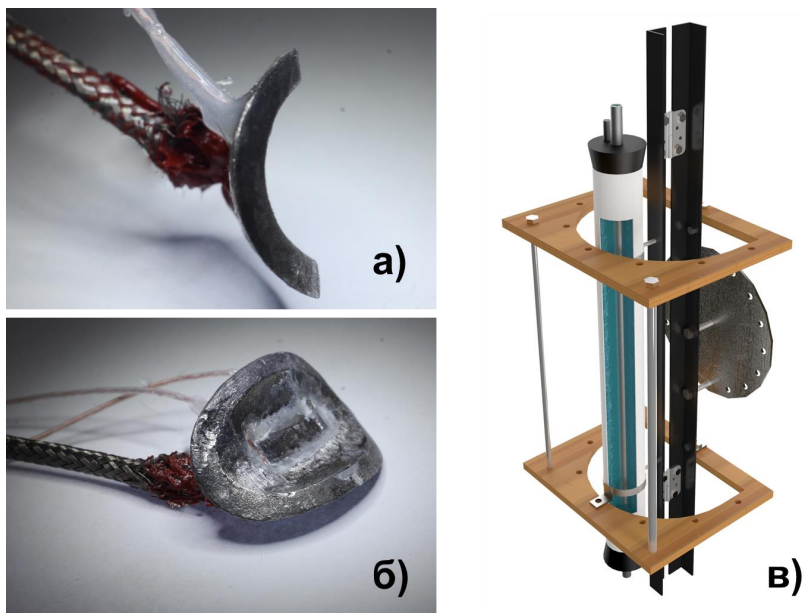


Рис. 1. Измерительный сегмент (а, б) и экспериментальный стенд в сборе (в).

Результаты. Для проверки применимости градиентной теплотметрии к изучению конденсации внутри трубы проведены опыты с традиционной подачей пара сверху.

Эксперименты на этой установке [6] показали, что она нуждается в доработке. На внешнюю стенку трубы была добавлена термопара для расчета плотности теплового потока методом термометрии. Экспериментальный участок был установлен на раму, которая позволила отклонять трубу от вертикали.

Так как при наклоне трубы течение конденсатной плёнки несимметрично, в установке предусмотрен поворот экспериментального участка вокруг его оси. Это позволило получить распределение плотности теплового потока по периметру внутренней поверхности трубы (Рисунок 1, в).

Градуировка ГГДТП производилась абсолютным методом. Относительная неопределенность градуировки составила 8%. При температуре на внутренней стенке трубы 70...85 °С вольт-ваттная чувствительность составляет 0,008 мВ/Вт.

На рисунке 2, а представлены временные теплотграммы, полученные при мощности парогенератора 12 кВт. Видны пульсации плотности теплового потока на ГГДТП №3 и ГГДТП №4, что соответствует волнообразованию в пленке конденсата.

В новой серии опытов сопоставлены результаты, полученные методами теплотметрии и термометрии. На рисунке 2, б представлены временные теплотграммы для ГГДТП и плотности теплового потока, рассчитанные по показаниям термопар. Видно, что ввиду инерционности стенки термопары не полностью фиксируют колебания плотности теплового потока, а, значит, и не дают полную картину теплообмена.

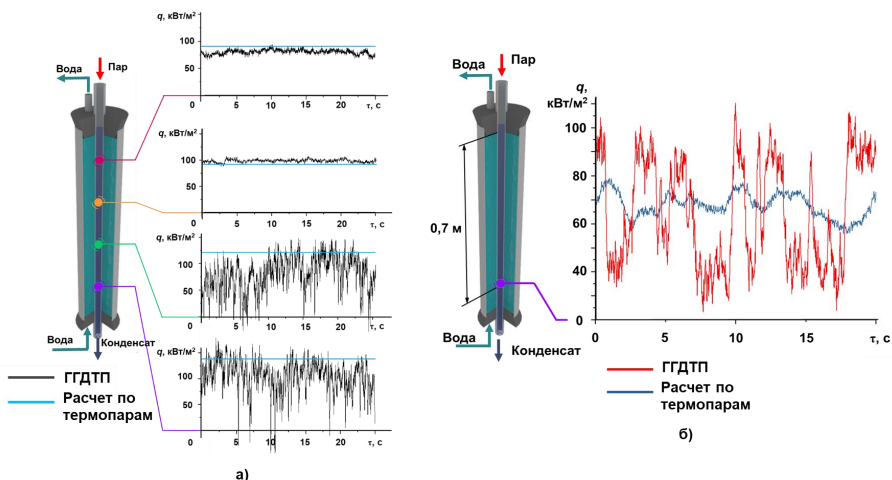


Рис. 2. Теплограмма эксперимента при подаче пара сверху (а), сравнение плотности теплового потока, полученного по показаниям ГГДТП и расчета по термопарам.

Заключение и выводы. Разработана, изготовлена и протестирована экспериментальная установка для исследования конденсации с использованием гетерогенных градиентных датчиков теплового потока.

Выявлено преимущество теплотрии перед термометрией. Показаны новые возможности в исследовании конденсации с помощью ГГДТП.

Градиентная теплотрия будет использована в более широком круге задач, связанных с конденсацией пара внутри труб.

ЛИТЕРАТУРА:

1. A. V. Mityakov, S. Z. Sapozhnikov, V. Y. Mityakov, A. A. Snarskii, M. I. Zhenirovsky, and J. J. Pyrhönen, Gradient heat flux sensors for high temperature environments, / *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 176, pp. 1–9, (2012).
2. Митяков В.Ю., Гусаков А.А., Сероштанов В.В., Павлов А.В., Греков М.А. Исследование течения и теплообмена у поверхности одиночного кольцевого ребра. Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2018. № 1 (44). С. 14-21.
3. Mityakov A., Babich A., Bashkatov A., Gusakov A., Dymkin A., Zainullina E., Sapozhnikov S., Mityakov V., Seroshtanov V. Investigating heat transfer augmentation using gradient heat flux measurement and PIV method. *MATEC Web of Conferences*. 33. "33rd Siberian Thermophysical Seminar, STS 2017" С. 02006. (2017)
4. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В., Винцаревич А.В., Герасимов Д.В. Прямое измерение теплового потока в камере сгорания дизельного двигателя методом градиентной теплотрии. Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2018. № 1 (44). С. 38-44.
5. Сапожников, В.Ю. Митяков, А.В. Митяков, А.В. Винцаревич, Д.В. Герасимов, А.В. Павлов, Л.А. Воробьев, А.В. Ларин, Градиентная теплотрия при мониторинге дизельного двигателя Тепловые процессы в технике №3-4, с. 166-170
6. Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р., Жидков Н.А., Ананьев К.А. Исследование теплообмена при конденсации внутри труб методом градиентной теплотрии. Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. 2018.

НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ТИПА ВК С ПОМОЩЬЮ ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА

Одним из способов удешевления электроэнергии, вырабатываемой на АЭС, является уменьшение затрат на её строительство. Использование реакторов с кипящим теплоносителем удешевляет капитальные затраты на строительство АЭС, так как в них используются одноконтурная схема без парогенератора, а также приблизительно в два раза меньшее давление теплоносителя, что позволяет снизить металлоёмкость всей конструкции реактора, по сравнению с получившими наибольшее распространение реакторами типа ВВЭР. В связи с этим возникает необходимость определения нейтронно-физических характеристик таких реакторов.

Для оценочного расчёта выбран реактор ВК-300, разрабатываемый в НИКИЭТ и основанный на освоенном промышленностью реакторе ВВЭР-1000 [1]. Основные характеристики ВК-300 приведены в таблице 1. Геометрические характеристики твэлов, ТВС и реактора, согласно источнику [2], аналогичны реактору ВВЭР-1000.

Таблица 1 – Параметры реактора ВК-300 [1 – 3]

Номинальная тепловая мощность реактора, МВт	750
Температура пара на выходе из реактора, °С	285
Давление пара на выходе из реактора, атм.	70
Обогащение топлива, %	4,0
Эквивалентный диаметр, мм	3120
Высота, мм	3550
Шаг между топливными сборками, мм	241
Размер ТВС «под ключ», мм	234
Количество твэл в тепловой сборке, шт.	312
Количество ТВС, шт.	163
Количество трубок 10,3×0,65 мм в центре ТВС	1
Наружный диаметр твэл, мм	9,1 мм
Шаг между твэл, мм	12,75 мм
Толщина оболочки твэл, мм	0,7 мм
Внешний диаметр топливной таблетки, мм	7,57 мм
Внутренний диаметр топливной таблетки, мм	2,2 мм
Материал топливной таблетки	UO ₂

Нейтронно-физический расчёт проводился на основе многогрупповой системы уравнений диффузии:

$$D^{(i)}\Delta\Phi^{(i)} - \Sigma_a^{(i)}\Phi^{(i)} - \sum_{k=i+1}^{26} \Sigma_R^{i \rightarrow k} \Phi^{(k)} + \sum_{k=1}^{i-1} \Sigma_R^{k \rightarrow i} \Phi^{(k)} + \varepsilon^{(i)} \sum_{k=1}^{26} \nu_f^{(k)} \Sigma_f^{(k)} \Phi^{(k)} = 0, \quad (1)$$

где i – номер группы, для которой записано уравнение; k – номер группы; $D^{(i)}$ – коэффициент диффузии нейтронов i -ой группы; $\Phi^{(i)}, \Phi^{(k)}$ – плотности потоков нейтронов в соответствующих группах; $\Sigma_a^{(i)}$ – макроскопическое сечение поглощения нейтронов i -ой группы; $\Sigma_R^{i \rightarrow k}, \Sigma_R^{k \rightarrow i}$ – макроскопическое сечение перехода нейтронов из i -ой в ниже лежащую k -ую (из выше лежащей k -ой в рассматриваемую i -ую) группу,

соответственно; $\varepsilon^{(i)}$ – вероятность для нейтрона деления попасть непосредственно в i -ую группу; $\nu_f^{(k)}$ – среднее число нейтронов на акт деления; $\Sigma_f^{(k)}$ – макроскопическое сечение деления для нейтронов k -ой группы [4].

После определения нейтронно-физических характеристик проводилась оптимизация элементарной ячейки, изменялись внешний и внутренний диаметры топливной таблетки. Наибольшее значение $k_{эф}$ достигалось при внешнем диаметре 0,53 см и внутреннем 0,1 см.

При данных параметрах запасы реактивности в различных состояниях: «холодного» реактора с плотностью воды 1 г/см³ и «горячего» реактора с плотностью воды 0,7416 г/см³ без пара, «горячего» реактора с паром, соответственно равны:

$$\rho_{хол} = 26,81 \% ; \rho_{гор} = 25,06 \% ; \rho_{пар} = 23,91 \% , \quad (2)$$

где $\rho_{хол}$ – реактивность «холодного» реактора; $\rho_{гор}$ – реактивность «горячего» реактора; $\rho_{пар}$ – реактивность горячего реактора с паром.

Тогда температурный и паровой эффекты реактивности соответственно равны:

$$\rho_t = \rho_{гор} - \rho_{хол} = -1,75 \% ; \rho_n = \rho_{пар} - \rho_{гор} = -1,15 \% , \quad (3)$$

где ρ_t – температурный эффект реактивности; ρ_n – паровой эффект реактивности.

Так как температурный и паровой эффекты реактивности отрицательны, реактор обладает свойством самозащищённости. При неконтролируемом увеличении мощности, реактивность будет уменьшаться, и, следовательно, мощность стабилизируется на некотором значении.

Далее рассчитывалась кампания ядерного топлива для различных загрузок с помощью системы дифференциальных уравнений, описывающих изменение нуклидного состава топлива во времени:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN_5}{dt} = -\bar{\sigma}_a^5 \cdot N_5 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_8}{dt} = -\bar{\sigma}_a^8 \cdot N_8 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_9}{dt} = -\bar{\sigma}_a^9 \cdot N_9 \cdot \bar{\Phi} + \bar{\sigma}_c^8 \cdot N_8 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_0}{dt} = -\bar{\sigma}_a^0 \cdot N_0 \cdot \bar{\Phi} + \bar{\sigma}_c^9 \cdot N_9 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_1}{dt} = -\bar{\sigma}_a^1 \cdot N_1 \cdot \bar{\Phi} + \bar{\sigma}_c^0 \cdot N_0 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_2}{dt} = -\bar{\sigma}_a^2 \cdot N_2 \cdot \bar{\Phi} + \bar{\sigma}_c^1 \cdot N_1 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_{ПД_5}}{dt} = 2 \cdot \bar{\sigma}_f^5 \cdot N_5 \cdot \bar{\Phi}; \\ \frac{dN_{ПД_9}}{dt} = 2 \cdot \bar{\sigma}_f^9 \cdot N_9 \cdot \bar{\Phi}, \end{array} \right. \quad (4)$$

где $N_{5, 8-2, ПД_5, 9}$ – ядерные концентрации $U^{235, 238}$, $Pu^{239-242}$, продуктов деления U^{235} , Pu^{239} ; $\bar{\sigma}_{a, c, f}^{5, 8-2}$ – усреднённые по спектру нейтронов микроскопические сечения поглощения,

радиационного захвата нейтронов и деления $U^{235, 238}$, $Pu^{239-242}$; $\bar{\Phi}$ – средний поток нейтронов в активной зоне; t – время, прошедшее с некоторого начального момента времени.

Результаты определения длительности кампании ядерного топлива приведены на рисунке 1.

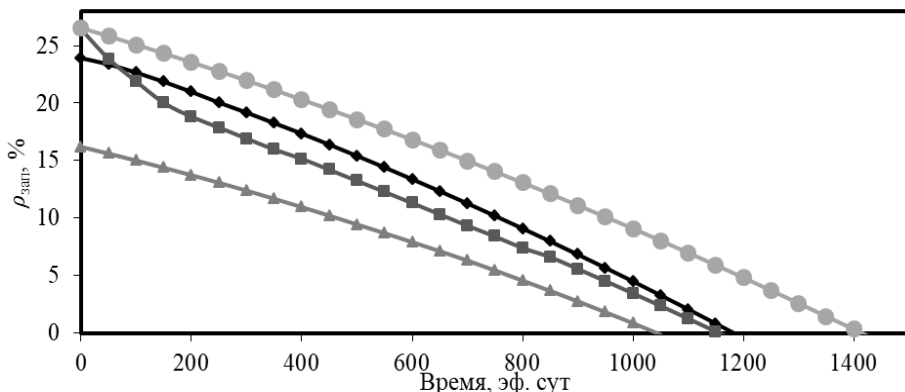


Рис. 1. Изменение запаса реактивности во времени:

◆ – $U^{235}-U^{238}$, ■ – $Pu^{239}-U^{238}$, ◊ – $U^{235}-Th^{232}$; ○ – $U^{233}-Th^{232}$

Из рисунка 1 видно, что наибольшей длительностью кампании обладает ядерное топливо на основе $U^{233}-Th^{232}$, что связано с высокой эффективностью деления U^{233} и большим коэффициентом воспроизводства Th^{232} . Топливо на основе $U^{235}-U^{238}$ и $Pu^{239}-U^{238}$ имеют практически одинаковую длительность кампании, при различном начальном запасе реактивности, а так же различный характер изменения запаса реактивности в первые двести эффективных суток работы реактора. Использование U^{235} и Th^{232} является самым невыгодным с точки зрения длительности кампании ядерного топлива.

По результатам можно сказать, что наиболее выгодным является использование топлива состоящего из $U^{233}-Th^{232}$, но данный вид топлива не используется повсеместно, что делает не конкурентоспособным на сегодняшний день. Следовательно, наиболее приемлемым для данного реактора является традиционное топливо на основе $U^{235}-U^{238}$.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Реакторные установки атомных станций малой мощности / А.Н. Ачкасов, Е.В. Гольцов, Г.И. Гречко, Ю.Н. Кузнецов // Атомная энергия, – М.: Некоммерческая орг. «Ред. журн. “Атомная энергия”» 2012. Т. 113, вып. 1. С. 43–48.
2. Gabaraev B.A., Cherepnin Y.S. Innovative Designs of Nuclear Reactors //Nuclear Power and Energy Security. – Springer, Dordrecht, 2010. – P. 235-246.
3. Колпаков Г.Н. Конструкции твэлов, каналов и активных зон энергетических реакторов: учебное пособие / Г.Н. Колпаков, О.В. Селиванова – Томск: Изд-во Томского политехнического ун-т, 2009. – 118 с.
4. Головацкий А.В. Организация итерационного процесса при численном восстановлении спектра нейтронов в размножающей среде с графитовым замедлителем / А.В. Головацкий, В.Н. Нестеров, Шаманин И.В. // Известия высших учебных заведений. Физика. – Томск: Изд-во научно-технической лит., 2004. вып. 1. С. 1–5.

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛООВОГО НАСОСА С
СИСТЕМОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ КОНДЕНСАЦИИ
ДЛЯ ОТОПЛЕНИЯ ЛЕДОВЫХ АРЕН**Введение.**

В настоящее время в связи с постоянным ростом цен на энергоресурсы на территории РФ активно развивается направление по энергосбережению. Ставятся задачи по сокращению затрат на отопление за счет внедрения энергетически эффективных решений [1, 2].

Одним из наиболее популярных способов использования энергии окружающей среды (грунт, вода, воздух) является использование Теплового насоса (далее – ТН). В основе концепции работы ТН лежит сбор низкопотенциальной энергии и её использование, как в целях отопления, вентиляции, так и для нагрева воды для хозяйственных нужд [3].

Кроме того, на предприятиях экономически выгодно проведение модернизации существующего технологического оборудования для увеличения энергетической эффективности инженерных систем, которое в большинстве случаев [4, 5] подобрано с запасом. Одним из таких методов экономии энергии является утилизация тепла, выделяемого при различных технологических процессах, и использование этой тепловой энергии для нужд потребителя [6, 7]. В настоящее время утилизация тепла и использование возобновляемых источников энергии в системах создания микроклимата получили широкое распространение в системе воздушного отопления [8, 9].

Объектом исследования является отопление ледовых арен СПб ГБУ СШОР по фигурному катанию на коньках (рис. 1) с тепловым насосом и внедренной системой частичной утилизации теплоты конденсации тепловых машин

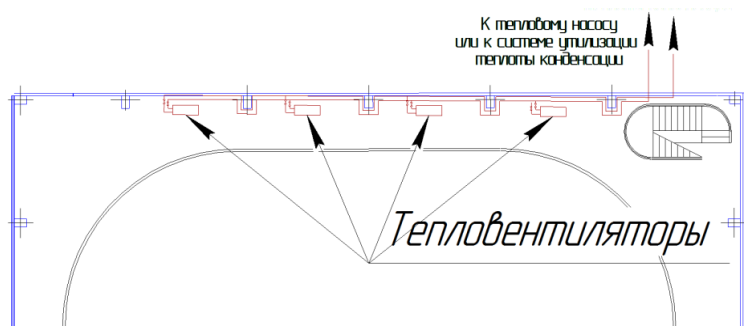


Рис. 1. Ледовая арена. Тепловентиляторы воздушного отопления.

Цель работы состоит в выявлении проблем, связанных с перерасходом энергии, затрачиваемой на поддержание микроклимата на спортивных объектах с искусственным намораживанием ледовой поверхности, и их решении.

Актуальность обусловлена экономическими и экологическими аспектами. Проведен общий анализ существующих технологий и примеры внедрения этих технологий на спортивных объектах. Предложены новые схемы организации отопления и пути снижения

расходов. Описан положительный эффект и расчетные условия для достижения целей энергосбережения. Предложены дальнейшие пути развития систем отопления и вентиляции.

Задачей работы является определение экономически и энергетически выгодного решения путем проведения соответствующих расчетов и замеров применения теплового насоса и системы утилизации теплоты конденсации тепловых машин для отопления ледовых арен [10].

Методы исследования.

В работе проведено фактическое исследование применения теплового насоса и внедрение системы утилизации теплоты конденсации тепловых машин при воздушном отоплении ледовых арен.

Оборудование.

Учреждение, в котором производится исследование: СПб ГБУ СШОР по фигурному катанию на коньках, расположенного по адресу Санкт-Петербург ул. Туполева, дом 4.

В состав энергоустановки входит

- три ледовых арены (2 арены – 30x60 кв.м. и 1 арена 20x24 кв.м., общая площадь 4100 кв.м.)
- три холодильных машины BE/SMED-BT2402 производства Climaveneta, в составе которых по два полугерметичных винтовых компрессора Bitzer CSH 8571-140Y-40D, с суммарной производительностью по холоду 900 кВт
- три воздушных конденсатора FRIGA-BOHN ECA08P9 P10C3
- шесть форконденсаторов Alfa Laval CPS/S 145
- циркуляционный насос контура Wilo IL50/170-7.2/2
- двадцать тепловентиляторов VEABA W61
- тепловой насос SRAN-R-SL 1202 производства Climaveneta, теплопроизводительностью 357 кВт.

Ранее до внедрения системы утилизации теплоты конденсации тепловых машин отопление ледовых арен разделялось на два этапа – отопительный и межотопительный.

В отопительный период отопление ледовых арен осуществлялось за счет тепла, подаваемого от теплоснабжающей организации, а в межотопительный за счет теплового насоса.

В настоящий момент в отоплении ледовых арен постоянно задействована только система утилизации теплоты конденсации тепловых машин.

Результаты исследования.

1. При использовании теплового насоса стоимость эксплуатации за 5 мес. составила 684000 р.
2. При использовании за тот же период только системы утилизации теплоты конденсации тепловых машин стоимость эксплуатации составила 162000 р.
3. Экономия за 5 месяцев при использовании системы утилизации теплоты конденсации составит 522 000 р. или 104 000 р. ежемесячно.

Выводы.

1. Внедрение системы частичной утилизации теплоты конденсации холодильных машин, для отопления ледовых арен за счет тепловентиляторов обеспечивает экономию энергоресурсов.
2. При отказе от тепла, подаваемого ГУП ТЭК для нагрева теплоносителя для тепловентиляторов ледовых арен в пользу применения системы утилизации теплоты конденсации холодильных машин с учетом затрат на фактическое внедрение экономия составляет 2 млн.р. в год.
3. Имеет место снижение теплового загрязнения Санкт-Петербурга от Учреждения на уровне $1,7 \cdot 10^9$ Вт в год.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Полякова В.Ю., Калинина Т.О., Кичин К.В. Анализ энергоэффективности тепловых насосов в системах теплоснабжения по территориально-климатическому признаку. Молодой ученый. 2016. №27. С. 142-146.
2. РФ. Законы. Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации от 23.11.2009 г. № 261-ФЗ.
3. Недвига П.Н. Возможности использования тепловых аккумуляторов и низкопотенциального тепла земли при отоплении индивидуальных домов. Инженерно-строительный журнал. №3. 2010.
4. Симбирев О.В. Перспективы модернизации систем отопления и вентиляции зданий. Colloquium-journal. 2019. № 13-2 (37). С. 207-208.
5. Сибикин Ю. Д. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. – Академия, 2007. Особенности теплообмена воздушных прослоек с внутренними криволинейными канавками / В.А.
6. Минко, Н.С. Кобелев, П.Ю.Щедрин, Г.Г. Щедрина. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2011. №2. С.149-152.
7. Патент РФ № 2011108998, 27.07.2011. Ильина Т.Н, Мухамедов Р.Ю., Сериков С.В. Устройство для регенерации энергии в установке техники кондиционирования и вентиляции. Патент России № 106938. 2011. Бюл. №21.
8. Щукина Т.В. Разработка технологий повышения энергоактивности зданий с системами солнечного теплоснабжения. Промышленное и гражданское строительство. 2008. №2. С. 42-44.
9. Кушев Л.А., Золотухин А.П., Савкин Д.А. Применение инъекции в тепловой насосной установке для повышения энергоэффективности системы. Инновационные материалы и технологии: сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф., Белгород: Изд-во БГТУ, 2012. Ч.1. С.167-174.
10. Сериков С.В. Утилизация тепла уходящих газов котельной установки в системе воздушного отопления. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2013. №4. С. 53-55.

УДК 621.039.524:536.24

М.И. Ивков, И.Л. Парамонова, Н.Д. Агафонова
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ РЕЖИМА С РАЗРЫВОМ ТРУБОПРОВОДА ПИТАТЕЛЬНОЙ ВОДЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СТАТИСТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РУ С ВВЭР

Введение. Атомные электростанции с реакторами, охлаждаемыми водой под давлением получили широкое распространение как в России (ВВЭР), так и за рубежом (PWR). Поэтому уже на стадии проектирования необходимо производить расчетные анализы режимов проектных и запроектных аварий с целью разработки стратегии действий для предотвращения последствий возможной аварии и доведения реакторной установки (РУ) до безопасного состояния. Под безопасным состоянием РУ понимается состояние РУ, при котором реактор подкритичен ($k_{\text{эф}}$ менее 0,98), обеспечен отвод остаточных тепловыделений, давление в первом контуре не превышает 1,96 МПа, средняя температура в первом контуре не превышает 140 °С, т.е. созданы условия для подключения к первому контуру системы отвода остаточного тепла [1, 2].

Гильотинный разрыв трубопровода питательной воды между парогенератором и обратным клапаном представляется наиболее консервативным из всех возможных вариантов разрывов, так как в этом случае выброс пароводяной смеси в разрыв происходит за более короткий промежуток времени по сравнению с частичными разрывами. Истечение пароводяной смеси приводит к быстрому опустошению аварийного парогенератора и, соответственно, к разогреву теплоносителя первого контура. В результате разрыва трубопровода питательной воды между парогенератором и обратным клапаном происходит

двухстороннее истечение теплоносителя в разрыв как из аварийного парогенератора, так и из коллектора питательной воды, что является наиболее консервативным случаем разрыва, поэтому в данной работе рассматривается именно он.

Цель работы – проведение расчетного анализа режима с разрывом трубопровода питательной воды и статистического анализа неопределенностей с использованием методов Спирмена и Пирсена для обоснования безопасности РУ.

Расчетный анализ включал следующие этапы:

- предварительный анализ протекания режима и основных физических явлений в ходе переходного процесса, предварительный выбор возможных единичных отказов и параметров для выполнения анализа чувствительности;
- базовый расчет с использованием расчетного кода в точечной модели нейтронной кинетики;
- проведение анализа чувствительности и неопределенностей в программном комплексе ПАНДА по методике, указанной в [3];
- обоснование безопасности РУ с ВВЭР.

Результатом работы является получение последовательности процессов по переводу РУ в безопасное состояние и получение графиков зависимостей основных теплогидравлических и нейтронно-физических параметров от времени, а также получение трубок неопределенностей в соответствии с анализом неопределенности.

В ходе исследования использовались следующие допущения:

1. Начальные параметры РУ принимались в реалистическом приближении с учетом их отклонений от номинальных значений, связанных с погрешностью измерений и точностью регулирования системы контроля и управления в пределах технических спецификаций;
2. Потеря внешнего электроснабжения не учитывалась;
3. Согласно сценарию аварии, принималось, что оперативный персонал станции не предпринимал никаких действий в течение 30 мин после возникновения исходного события;
4. Сигналы аварийной и предупредительной защит реактора, формируемые по локальным параметрам, не учитывались;
5. Модель выполнялась в приближении точечной нейтронной кинетики;
6. Системы нормальной эксплуатации не участвовали в проектных авариях для наиболее консервативного расчета;
7. При проведении расчета не учитывались различия между началом и концом кампании. Все параметры рассчитывались как рамочные и принималась наихудшая комбинация параметров;
8. Давление в защитной оболочке в процессе расчета принималось постоянным и равным 0,1 МПа, так как при этом выброс пароводяной смеси из парогенератора максимален.

В ходе расчета была осуществлена модернизация расчетной модели под поставленную задачу с выбранными наиболее консервативными единичным отказом и комбинацией значений исходных параметров. Был выполнен статический анализ неопределенностей, по которому были построены трубки неопределенностей, и чувствительности, по которым были построены графики зависимости коэффициента корреляции варьируемых параметров от времени. На рис. 1. представлен характерный график трубки неопределенностей для давления на выходе из реактора.

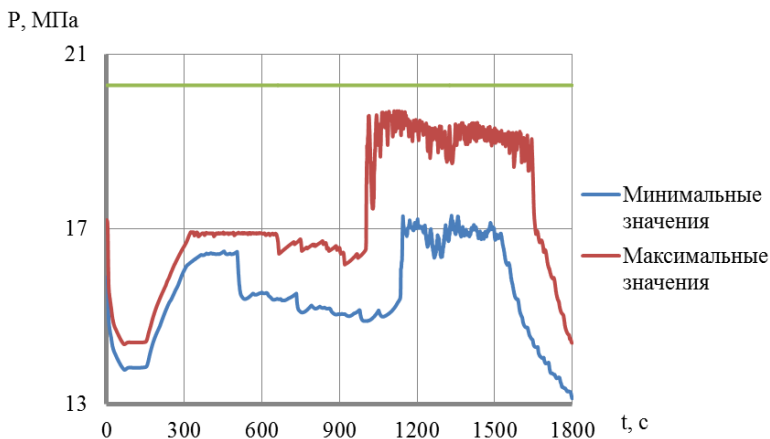


Рис.1. Трубка неопределенностей для давления на выходе из реактора

Выводы. Результаты выполненных расчетов продемонстрировали принципиальную применимость предложенной расчетной модели для обоснования безопасности РУ с ВВЭР, так как она в точности повторяет проектный сценарий протекания аварии, что свидетельствует о корректности моделирования процессов. Кроме того, получено, что во всех, даже наиболее консервативных вариантах, отсутствуют нарушения приемочных критериев, принятых для проектных аварий и условий для возникновения повторной критичности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций, ПБЯ РУ АЭС. НП-082-07. М., 2007.
2. Шкаровский А.Н., Аксенов В.И., Колеватых А.П., Сердунь Н.П., Росляков А.А. Расчетно-техническое обоснование противоаварийных процедур АЭС с ВВЭР-1000 // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – №3-1. – С.54-64.
3. Владимиров А.В., Грановский В.С., Гудошников А.Н., Данилов И.Г., Донченко И.Г., Коротаев В.Г., Мигров Ю.А. Анализ неопределённости при численном моделировании аварийных режимов ВВЭР с помощью ПК ПАНДА/КОРСАР // Тезисы докладов межведомственного семинара ТЕПЛОФИЗИКА-2008, Обнинск, 2008.

УДК 621.577.42

К.С. Калмыков, И.Д. Налетов, И.Д. Аникина
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОНАСОСНЫХ УСТАНОВОК РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНОВОК В РЕАЛЬНЫХ ПАРОТУРБИННЫХ ЭНЕРГООБЛОКАХ С ТУРБИНАМИ ПТ-80 И Т-250

Введение. Необходимость повышения продуктивности генерации энергии и теплофикации на теплоэлектроцентралях (ТЭЦ) привлекают внимание к технологии тепловых насосов, которые позволяют эффективно перераспределять потоки энергии.

Актуальность. Обилие низкопотенциальных источников теплоты в принципиальной схеме работы ТЭЦ требует модернизации производства и повышения коэффициента использования теплоты топлива, следовательно, снижения удельных расходов топлива на производство энергии. Теплонасосные установки (ТНУ) различной компоновки способны повысить эффективность работы ТЭЦ за счет использования сбросной низкопотенциальной теплоты в цикле [1, 2].

Цель работы. Проанализировать эффективность включения парокompрессионных ТНУ разных компоновок в схему подогрева обратной сетевой воды (ОСВ) для энергоблоков (ЭБ) с паротурбинными установками (ПТУ) ПТ-80 и Т-250.

Анализ выполняется посредством реализации методов имитационного моделирования с помощью САПР «United Cycle» (Россия), использующей алгоритм, позволяющий по параметрам базового варианта определять характеристики работы энергооборудования в схемах любой сложности при различных режимах работы.

На примере тепловых схем ЭБ с турбинами ПТ-80 и Т-250 исследуется использование ТНУ в системе теплофикации (для подогрева ОСВ) и ее влияние на работу ТЭЦ. Все расчеты производятся для зимнего режима работы с малыми отопительными нагрузками.

Источником низкопотенциальной теплоты (ИНТ) для ТНУ является охлаждающая вода на выходе из конденсатора ПТУ. Схема подключения конденсатора ТНУ к трубопроводу подачи обратной сетевой воды тепловой сети до теплофикационной установки энергоблоков (рис.1) является универсальной и подходит как для закрытой, так и для открытой систем теплоснабжения. Самым простым и экономичным является вариант использования теплоты от конденсатора ТНУ для увеличения отпуска теплоты от ТЭЦ [3]. Для моделирования и расчетов выбран именно этот вариант.

В данной работе рассматриваются схемы следующих парокompрессионных ТНУ: без модификаций (1), с регенеративным теплообменником (РТО) (2), с РТО и переохладителем (ПО) (3). Мощность ТНУ составляет 13 МВт. Рабочим телом является хладон R134a. Исходные данные для расчета приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Исходные данные для расчета ТНУ

Параметры	ПТ-80	Т-250
Расход охлаждающей воды, кг/с	417	1945
Температура ИНТ перед/после ТНУ, °С	31,9/25	27,6/25
Температура ОСВ перед ТНУ, °С	57	63

Таблица 2 – Исходные данные для расчета режимов работы энергоблоков с ТНУ

Параметры	ПТ-80	Т-250
Отпущенная электрическая мощность, МВт	79,73	253,43
Отпущенная теплота, МВт	85,57	324,06
Мощность котельного агрегата, МВт	250,48	686,08
Мощность компрессора ТНУ, МВт	3,5	3,49

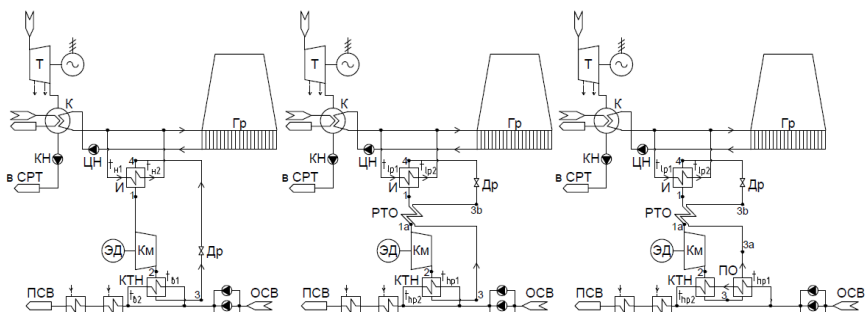


Рис. 1. Схемы включения ТНУ для подогрева ОСВ без РТО, с РТО, с РТО и ПО (Т – турбина, Гр – башенная градирня, К – конденсатор ПТУ, СРТ – система регенеративного подогрева питательной воды ПТУ, СП – подогреватель сетевой воды, ОСВ – обратная сетевая вода, ПСВ – прямая сетевая вода, КН – конденсатный насос, РТО – регенеративный теплообменник ТНУ, ПО – переохладитель ТНУ, И – испаритель, Др – дроссель, КТН – конденсатор ТНУ, Км – компрессор, ЭД – двигатель компрессора)

Результаты расчетов удельных расходов топлива на производство тепловой и электроэнергии для энергоблоков с турбинами ПТ-80 и Т-250 представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Удельные расходы топлива для энергоблоков с турбинами ПТ-80 и Т-250

	Удельный расход на отпуск т/э, г/(кВт·ч)	Удельный расход на отпуск э/э, г/(кВт·ч)
ПТ-80	122,8	247,6
Т-250		195,4

Результаты расчетов удельных расходов топлива при внедрении ТНУ в схему подогрева ОСВ представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Удельные расходы топлива для энергоблоков с турбинами ПТ-80 и Т-250 с ТНУ различной компоновки с хладагентом R134а.

Удельный расход на отпуск т/э, г/(кВт·ч)	ПТ-80			Т-250			
	Удельный расход на отпуск э/э, г/(кВт·ч)			Удельный расход на отпуск т/э, г/(кВт·ч)	Удельный расход на отпуск э/э, г/(кВт·ч)		
	1	2	3		1	2	3
104,1	273,7	273,5	270,5	117,9	199,3	199,2	198,5

Экономический эффект рассчитывался исходя из соотношения полученной выручки от работы ТНУ (отпуск теплоты) и увеличения затрат электроэнергии на собственные нужды (СН) (привод компрессора ТНУ) [4]. Расчеты производились по тарифам на энергоносители для компании ПАО «ГМК-1» в 2019 году (формула 1). Результаты приведены в таблице 5.

Положительный экономический эффект от внедрения ТНУ определяется формулой:

$$ПЭФ = \Delta Q_T \cdot C_T - \Delta Э_{СН} \cdot C_{СН}, \quad (1)$$

где ΔQ_T – приращение теплоты в результате внедрения ТНУ, МВт; $\Delta Э_{СН}$ – повышение затрат электроэнергии на СН, МВт; C_T – тарифная стоимость тепловой энергии на отпуск, руб./МВт; $C_{СН}$ – тарифная стоимость электрической энергии на СН, руб./МВт.

Таблица 5 – Квартальная экономия денежных средств для разных схем ТНУ

Экономия денежных средств, млн. руб./квартал					
ПТ-80			Т-250		
1	2	3	1	2	3
7,32	7,43	9,54	7,21	7,45	9,79

Экономическая выгода рассчитывалась по эксплуатационным характеристикам, без учета капитальных затрат, издержек, рисков и амортизационных отчислений (см. рис. 2, 3).

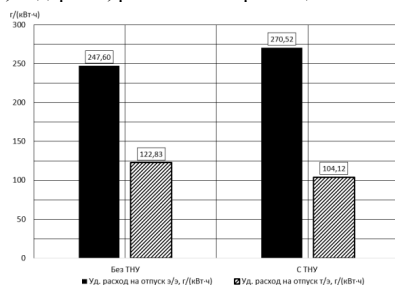


Рис. 2. Удельные расходы топлива на производство тепловой и электроэнергии для ЭБ с турбиной ПТ-80 без и с включением ТНУ с РТО и ПО (R134a) в схему подогрева ОСВ тепловой сети

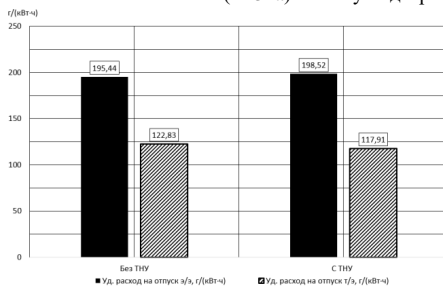


Рис. 3. Удельные расходы топлива на производство тепловой и электроэнергии для ЭБ с турбиной Т-250 без и с включением ТНУ с РТО и ПО (R134a) в схему подогрева ОСВ тепловой сети

Выводы. По результатам выполненного имитационного моделирования реальных тепловых схем энергоблоков с турбинами ПТ-80 и Т-250 с теплонасосной установкой определен наиболее эффективный вариант включения ТНУ. Анализ влияния включения теплового насоса на режим работы ПТУ показал преимущество схемы включения теплового насоса большой мощности (отпуск теплоты 13 МВт) с РТО и ПО. При использовании такой схемы экономия денежных средств в квартал может достигать 9,54 и 9,79 млн рублей для энергоблоков с турбинами ПТ-80 и Т-250.

ЛИТЕРАТУРА:

1. И.Д. Аникина и др. Применение тепловых насосов для повышения энергоэффективности паросиловых ТЭС. «Научно-технические ведомости СПбГПУ». Выпуск 3 (178), с.56-61 (2013).
2. I.D. Anikina. Influence of heat pumps inclusion in deaeration scheme of heating network make-up water on the operating modes of the TPP. “ЕЕСЕ-2018”. MATEC Web of Conferences 245, 15004 (2018).
3. N.T. Amosov and etc. Use of heat pumps in turbogenerator hydrogen cooling systems at thermal power plant. Inter. Journal of Hydrogen Energy 42-PP. 636-642 (2017).
4. M. Taylor. The role of heat pumps REHVA Journal 48 (4) PP. 13-15 (2011).

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СЕПАРАЦИИ ПАРА В СЕПАРАТОРАХ-
ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯХ ТУРБИН АЭС

В турбинах насыщенного пара АЭС сепаратор-пароперегреватель обеспечивает допустимую влажность в цилиндре низкого давления, что положительно сказывается на надежности и эффективности турбоустановки [1].

Цель работы. Разработка метода моделирования сепарационных процессов в жалюзийных сепараторах и путей повышения эффективности эксплуатируемых конструкций жалюзийных сепараторов.

Задачи работы. 1. Обоснование применимости модели переноса частиц для численного моделирования сепарационных процессов. 2. Численное моделирование рабочих процессов в жалюзийных сепараторах турбин К-500/65-3000.

Методы исследования. Исходные данные для расчета приняты в соответствии с номинальными параметрами действующей турбоустановки на Ленинградской АЭС-1.

Для исследования сепарационных процессов дисперсный двухфазный поток в сепараторе моделируется как два отдельных потока. Сухой насыщенный пар рассматривается как сплошная среда с помощью метода Эйлера, жидкая фаза представлена как поток капель воды, описываемый методом Лагранжа [2].

Одной из причин недостаточно полного осушения пара в сепарационной части является наличие мелких капель в потоке пара, образующихся в процессе сепарации. Они с существенной вероятностью могут покинуть сепаратор вместе с основным потоком пара [3].

Модель переноса частиц позволяет отследить траекторию капель воды в потоке пара. Сепарация капель воды происходит за счет их оседания на стенке, поэтому в данной модели предполагается, что при касании стенки жалюзийного сепаратора, капля остается на ней и стекает в сепаратосборник. Эффективность сепарации η определяется отношением массового расхода капель, не коснувшихся стенки и покинувших расчетную область $G_k^{в\text{ых}}$, к массовому расходу капель на входе в жалюзийный сепаратор $G_k^{вх}$ [4]:

$$\eta = 1 - \frac{G_k^{в\text{ых}}}{G_k^{вх}}$$

Влажность пара на выходе из сепаратора:

$$y_n^{в\text{ых.СПП}} = y_n^{вх.СПП} \cdot \eta.$$

Распределение капель по размеру имеет большое значение при расчете эффективности сепаратора. Объемное распределение капель по размерам в дисперсно-кольцевом потоке жалюзийного сепаратора принято по рекомендации работы [5].

Допущения, принятые в данной работе:

1. В расчете не рассматривается взаимодействие капель с пленкой и вторичное образование капель в сепараторе в связи с относительно небольшим размером капель и низким числом Вебера $We \leq 1$.

2. Среднее расстояние между частицами достаточно велико [6]. Поэтому капли жидкости: 1) не стесняют движение друг друга в ходе взаимного перемещения; 2) не соударяются; 3) не коагулируют; 4) не разрушаются;

3. Скорости капель и пара на входе в первом приближении принимаются равными

вследствие малого различия скоростей жидкой и сплошной фазы [7].

Моделирование проведено в программном комплексе ANSYS CFX, для описания движения капель воды использована модель переноса частиц жидкости (Particle Transport Fluid). Рассматривается стационарная задача. Граничные условия на входе в сепаратор – скорости пара и капель воды на входе в сепаратор равны и составляют 1,4 м/с. Массовый расход капель выбран так, чтобы влажность на входе в сепаратор составляла 10%. Начальное положение капель – случайное, равномерно распределенное по поверхности входа.

Анализ результатов моделирования.

На рисунке 1 изображены полученные с помощью численного моделирования траектории капель воды и распределение по диаметру капель в расчетной области сепаратора.

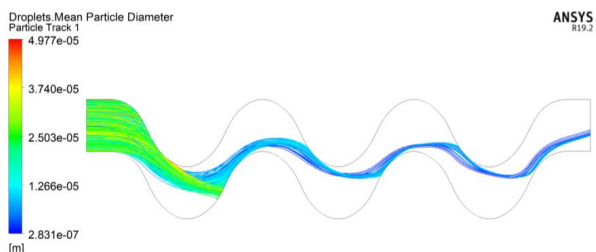


Рис. 1. Траектории и распределение диаметров капель по расчетной области в сепараторе.

Эффективность сепарации равна $\eta = 88,2\%$.

По результатам численного моделирования потери давления в жалюзийном сепараторе составляют 46,0 Па. Относительное отклонение величины потери давления, полученной аналитически и с помощью численного моделирования составляет 2,6% [8].

На основе анализа траекторий капель предлагается внести изменение в конструкцию сепарационных устройств и добавить влагозахватный канал на пути траектории мелких капель начиная с третьего поворота канала. Результаты моделирования предложенной конструкции представлены на рисунке 2. Эффективность сепарации пара в предложенной конструкции равна $\eta = 91,2\%$.

По результатам численного моделирования потери давления в предложенной конструкции составляют 62,4 Па. Потери давления увеличились на 35,5%, эффективность сепарации увеличилась на 2%. Учитывая, что потери давления в жалюзийном сепараторе относительно всего сепаратора-пароперегревателя составляют 0,2% [9], такое увеличение потери давления можно признать несущественным.

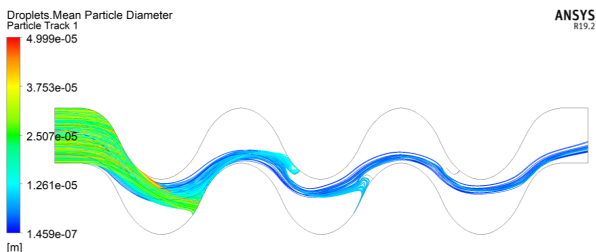


Рис. 2. Траектории и распределение диаметров капель по расчетной области в жалюзийном сепараторе с влагозахватными каналами.

Выводы.

1. Разработан метод численного моделирования сепарационных процессов в сепараторах жалюзийного типа. Получены траектории капель воды и распределение капель по диаметру, поле скорости и поле давления пара. Значение потери давления пара, определенное с помощью численного моделирования, совпадает со значением, рассчитанным аналитически с точностью 2,6%.

2. Предложена модернизация конструкции сепарационной части – уменьшение длины канала и добавление влагозахватных каналов на пути траектории мелких капель, рисунок 2.

3. Выполнена оценка влияния добавления одного влагозахватного канала (толщиной 25% от расстояния между пластинами сепаратора) на пути траектории мелких капель на эффективности сепарации. Оценка показала повышение эффективности сепаратора на уровне 2%.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Kolev N.I. Multiphase flow dynamics 5: nuclear thermal hydraulics. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 886 p.
2. Готовский М.А., Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. О перспективе применения винтовых змеевиков с конденсацией греющего пара внутри труб в пароперегревательной части промежуточных сепараторов-пароперегревателей турбин АЭС. Сборник тезисов докладов Пятой международной конференции «Тепломассообмен и гидродинамика в закрученных потоках». Казань, 2015. С. 162–163.
3. Liu Y., Qu Z. Numerical investigation of moisture separators with corrugated plates. Energy Procedia, 2017, vol. 105, p. 1501–1506.
4. Li G., Yan Ch., Wang J. Optimization of a moisture separator reheater. Annals of Nuclear Energy, 2014, vol. 73, p. 537–546.
5. Н.Д. Агафонова. Разработка методики расчета гидродинамики и капельного массообмена для высоких паросодержаний в трубчатых поверхностях нагрева парогенераторов с целью повышения надежности работы. Диссерт. канд. ...наук. Ленинград, 1983 – 168 с.
6. Егоров М.Ю., Готовский М.А., Федорович Е.Д. Повышение эффективности систем сепарации и перегрева пара в турбинах АЭС. Надежность и безопасность энергетики. 2011. № 14. С. 57–64.
7. Скворцов С.Д., Егоров М.Ю. Анализ теплопередачи в промежуточных сепараторах-пароперегревателях АЭС. Материалы научной конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ». Институт энергетики и транспортных систем. Изд-во Политехн. ун-та, Санкт-Петербург. 2016. Ч. 1. С. 84–87.
8. Gotovskii M.A., Fokin B.S., Belenkii M.Ya., Lebedev M.E., Blinov M.A., Egorov M.Yu. Results from tests of modernized moisture separator-reheater of K-500-65/3000 turbine plants of the power unit no. 4 at the Leningrad nuclear power plants (NPP). Thermal Engineering. 2012. Т. 59. № 2. Р. 113–118.
9. Егоров М.Ю., Федорович Е.Д. Совершенствование системы промежуточной сепарации и перегрева влажнопаровых турбин АЭС: анализ теплогидравлических процессов в конструкциях сепараторов-пароперегревателей на основе опыта эксплуатации. Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2007. № 37. С. 339–350.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ УЧЕТА КРИВЫХ КПД ОТСЕКА ПОСЛЕДНЕЙ СТУПЕНИ
ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ПРИ ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ТЕПЛОВОЙ
СХЕМЫ ПТУ К-1200-6,8/50

Актуальность работы. В настоящий момент происходит обширное проектирование и строительство новых энергоблоков атомных электрических станций (АЭС) с ядерным реактором типа ВВЭР и ПТУ К-1200-6,8/50, выполненных по проекту АЭС-2006 (Ленинградская АЭС-2, Нововоронежская АЭС-2 и др.). Однако все больше и больше уделяется внимания к маневренным характеристикам проектируемых энергоблоков и анализу режимов работы данных энергоблоков.

При исследовании режимов работы паротурбинных установок (ПТУ) АЭС, одной из важнейших характеристик являются кривые коэффициента полезного действия (КПД) отсеков последних ступеней ПТУ. К сожалению, доступ к информации о кривых КПД ограничен, в связи с тем, что данные кривые определяют профилирование рабочих лопаток паровых турбин, что является коммерческой тайной заводов-изготовителей ПТУ.

В результате этого при анализе режимов работы ПТУ АЭС стоит рассмотреть влияние данных кривых на показатели ПТУ.

Методы исследования. В качестве метода исследования был выбран метод имитационного моделирования тепловой схемы ПТУ. Имитационная модель ПТУ может быть воспроизведена с использованием САПР «United Cycle». САПР «United Cycle» позволяет моделировать режимы работы ПТУ с учетом фактических характеристик работы основного и вспомогательного оборудования ПТУ. Метод имитационного моделирования тепловых схем с использованием САПР «United Cycle», зарекомендовал себя, как эффективный метод анализа режимов работы энергоблоков ТЭС и АЭС [1].

Цели и задачи работы. Целью исследования является анализ влияния учета кривых КПД отсека последней ступени паровой турбины при выполнении расчетов режимов работы ПТУ К-1200-6,8/50 ПАО «Силловые машины» с использованием имитационного моделирования тепловой схемы. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- построить имитационную модель тепловой схемы ПТУ К-1200-6,8/50;
- выполнить параметризацию имитационной модели с использованием информации о кривых КПД отсека последней ступени паровой турбины;
- с использованием имитационной модели провести расчеты режимов работы ПТУ на режимах 100%, 90%, 80% и 70% от номинального режима работы ПТУ с учетом и без учета кривых КПД;
- провести анализ влияния кривых КПД на показатели ПТУ.

Полученные результаты. С использованием САПР «United Cycle», с учетом данных, приведенных в [2, 3], была построена имитационная модель тепловой схемы ПТУ К-1200-6,8/50 (см. рис. 1).

В имитационную модель было внесено следующее упрощение: не производилось моделирование системы уплотнений паровой турбины в связи с отсутствием данных о работе системы уплотнений паровой турбины.

Для последней ступени была учтена зависимость относительного внутреннего КПД отсека от расхода пара в отсек (см. рис. 2).

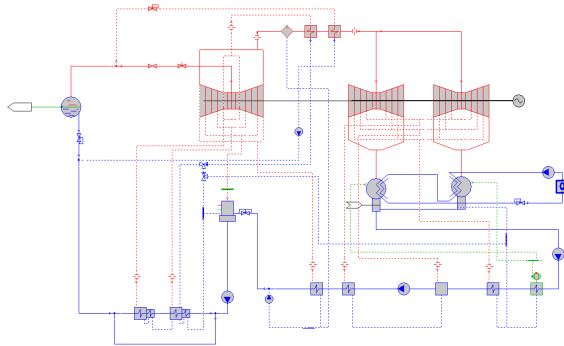


Рис. 1. Имитационная модель тепловой схемы ПТУ К-1200-6,8/50

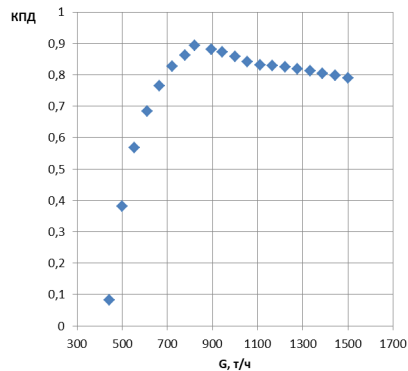


Рис. 2. Зависимость относительного внутреннего КПД отсека от расхода пара в отсек

В результате выполненных расчетов режимов работы ПТУ по имитационной модели на режимах 100%, 90%, 80% и 70% от номинального режима работы ПТУ с учетом и без учета кривых КПД были получены следующие результаты, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчетов режимов работы

Режим	Мощность последнего отсека для модели с кривыми КПД, МВт	Относительный внутренний КПД последнего отсека для модели с кривыми КПД, %	Мощность последнего отсека для модели без кривых КПД, МВт	Относительный внутренний КПД последнего отсека для модели без кривых КПД, %	Изменение параметров для модели без кривых КПД к модели с кривыми КПД, мощность/КПД, %
100%	37,34	0,8457	37,94	0,8585	1,61/1,51
90%	32,19	0,8583	32,23	0,8593	0,12/0,12
80%	25,02	0,8113	26,60	0,8601	6,31/6,02
70%	17,96	0,7383	21,11	0,8612	17,54/16,65

Выводы. При анализе полученных результатов можно сделать вывод о существенном влиянии характеристик КПД отсеков последних ступеней на показатели мощности и относительного внутреннего КПД отсеков при понижении мощности ПТУ, например при 100% режиме расхождение значений мощности и относительного внутреннего КПД отсеков составило 1,61% и 1,51% соответственно, а при 70% режиме расхождения достигли значений 17,54% и 16,65 % соответственно.

Таким образом, в случае выполнения анализа режимов работы ПТУ с использованием имитационного моделирования в САПР «United Cycle» в режимах 90-100% мощности учет характеристик КПД не имеет принципиального значения на результаты моделирования, а в случае анализа режимов работы в режимах меньше 90%, учет характеристик КПД отсеков имеет принципиальное значение и без учета данных характеристик, выполненные расчеты показателей режимов работы ПТУ будут иметь завышенные значения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. И.Д. Использование тепловых насосов в технологических схемах ТЭЦ с учетом особенностей режимов производства и потребления теплоты: дисс. канд. тех. наук: 05.14.14/ Аникина Ирина Дмитриевна. – СПб., 2016. – 198 с.
2. А.С. Лисянский, Н.А. Николаенков, В.В. Назаров, С.А. Иванов, Л.Я. Бальва, М.Г. Вишняков, В.В. Недавний. Современные быстроходные и тихоходные паровые турбины. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=2330> (дата обращения 01.10.2019).
3. Шевцов И.В. Оптимизация слива конденсата греющего пара СПП для турбоустановки АЭС с реактором ВВЭР: ВКР магистра. – СПб., 2017. – 65 с. URL: <http://elibr.spbstu.ru/dl/2/v17-2965.pdf/download/v17-2965.pdf> (дата обращения 01.10.2019).

УДК 621.577.42

Н.В. Колосова, И.Д. Аникина
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СОВМЕСТНАЯ ЭКСПЛУАТАЦИЯ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ И ПАРОВОЙ ТУРБИНЫ ТИПА Т-250/300-240

Актуальность. Рациональное использование и экономия топлива всегда были приоритетными задачами энергетической политики. Согласно Энергетической стратегии России на период до 2030 года предусматривается снижение использования природного газа и угля до 46-47% и увеличение доли использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также вторичных энергетических ресурсов (ВТЭР) до 13-14% [1]. Одним из вариантов достижения поставленной цели является включение теплонасосной установки (ТНУ) в тепловую схему ТЭЦ для утилизации низкопотенциальной теплоты циркуляционной воды и последующего подогрева обратной сетевой воды перед ПСГ, что позволяет повысить эффективность работы паротурбинного блока, снизить расход и температуру циркуляционной воды, тем самым повысить эффективность работы конденсатора и уменьшить затраты.

Цели и задачи работы. С помощью программного обеспечения Cool Pack оценить эффективность включения различных схем ТНУ в тепловую схему ТЭЦ на примере паровой турбины Т-250/300-240, а также разработать схемное решение включения ТНУ в состав оборудования ТЭЦ.

В данной статье рассмотрен характерный зимний режим работы энергоблока с турбиной Т-250/300-240 (рис. 1) со следующими исходными данными:

- температуры низкопотенциального источника теплоты на входе и выходе из теплового насоса (26.66 и 22°C);
- температура высокопотенциального источника теплоты на входе в тепловой насос (42.2°C);
- температура окружающей среды (-2°C);
- перепады температур на выходе из испарителя, конденсатора и переохладителя (5°C); температура перегрева в промежуточном теплообменнике (20°C).

Расчет проводился для двух схем парокомпрессионного теплового насоса (ПКТН) тепловой мощностью 5, 10 и 15 МВт: с регенеративным теплообменником (РТО), а также с РТО и переохладителем (ПО) [2]. В качестве рабочего тела использовался хладагент R152a. При полном расходе циркуляционной воды, равном 11350 т/ч, на охлаждение в ТНУ отбирается лишь часть воды для уменьшения затрат на привод циркуляционного насоса, потому как перекачивание всего объема циркуляционной воды является невыгодным при сравнительно малом отпуске теплоты.

Схема с РТО и переохладителем (табл. 1) является наиболее оптимальной, так как благодаря ПО перед дросселированием хладагент охлаждается до минимально возможной температуры и тем самым дает увеличение удельной теплопроизводительности [3]. Для схемы тепловой мощностью 15 МВт рассчитан массовый расход низкопотенциального источника теплоты, который составляет 764,9 кг/с, при этом расход хладагента равен 49,78 кг/с. Полезно использованная в цикле теплота составляет 12,83 МВт, теплота, переданная потребителю в конденсаторе ТНУ – 14,72 МВт.

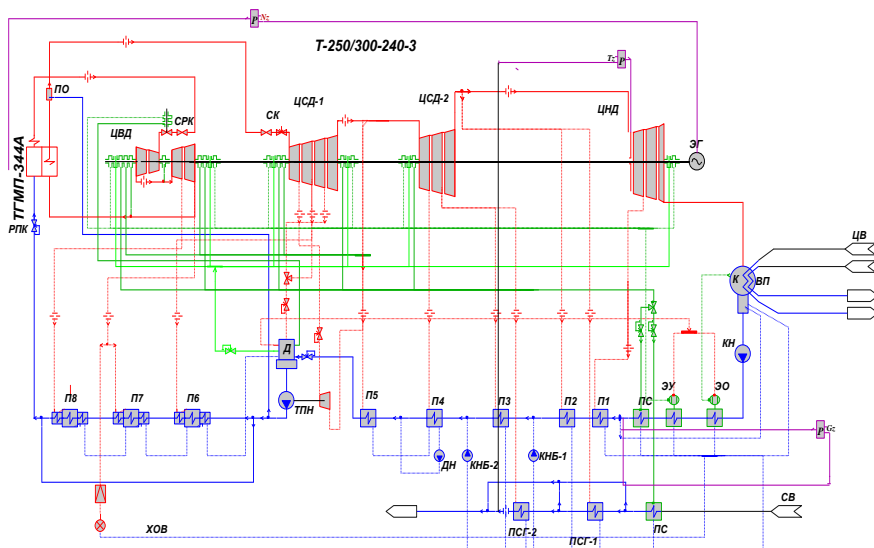


Рис. 1. Схема ПТУ Т-250/300-240: ЦВД –цилиндр высокого давления; ЦСД –цилиндр среднего давления; ЦНД –цилиндр низкого давления; ЭГ –электрический генератор; К –конденсатор паровой турбины; КН –конденсатный насос; П8-П7-П6-П5 (ПВД) –группа подогревателей высокого давления; П4-П3-П2-П1 (ПНД) –группа подогревателей низкого давления; ПС –подогреватель соленниковый; ЭЖ-1 и ЭЖ-2 –эжектор с охладителем; ПН –питательный насос; Д –деаэрактор

Таблица 1. Основные показатели энергетической эффективности ТНУ

Схема	Парокомпрессионный тепловой насос с регенеративным теплообменником			Парокомпрессионный тепловой насос с регенеративным теплообменником и переохладителем		
	5	10	15	5	10	15
Тепловая нагрузка, МВт	5	10	15	5	10	15
Удельная тепловая нагрузка теплового насоса, кДж/кг	297,7	296,6	295,6	299,2	300,3	301,3
Удельная энергия, потребляемая электродвигателем, кДж/кг	52,02	54,89	57,32	52,02	54,89	57,32
Степень сжатия в компрессоре	2,42	2,53	2,62	2,42	2,53	2,62
Коэффициент преобразования теплоты	7,53	7,11	6,79	7,57	7,20	6,92
Коэффициент преобразования электроэнергии	5,72	5,40	5,16	5,75	5,47	5,26
Удельный расход первичной энергии ПЭ	0,460	0,487	0,510	0,457	0,481	0,501
Эксергетический КПД	0,564	0,552	0,542	0,568	0,561	0,556

Анализируя полученные результаты, можно также отметить снижение температуры циркуляционной воды на 2 °С (с 26.66 до 24.66 °С) и подогрев обратной сетевой воды за счет использования ТНУ на 5 °С (с 42.22 до 47.22 °С). Схема включения ТНУ с РТО и ПО с приведена на рис. 2. Снижение температуры циркуляционной воды также обеспечивает снижение давления в конденсаторе, тем самым повышая эффективность его работы.

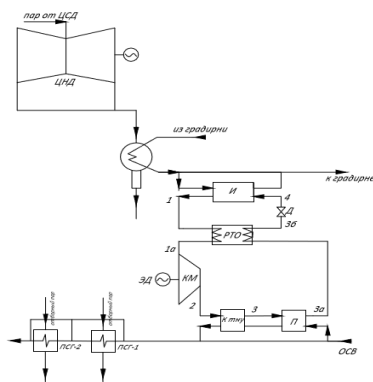


Рис. 2. Схема включения ТНУ с РТО и переохладителем в схеме оборотного водоснабжения ПТУ Т-250/300-240: ЦСД – цилиндр среднего давления; ЦНД – цилиндр низкого давления; И – испаритель ТНУ; РТО – регенеративный теплообменник ТНУ; КМ – компрессор ТНУ; ЭД – электродвигатель ТНУ; К_{кон} – конденсатор ТНУ; П – переохладитель ТНУ; Д – дроссельный вентиль ТНУ, ПСГ 1-2 – подогреватели сетевые горизонтальные.

Выводы. Использование ТНУ в цикле ПТУ Т-250/300-240 в условиях характерного зимнего режима позволяет охладить циркуляционную воду на 2 °С, что уменьшает потери низкопотенциальной теплоты в атмосферу и позволяет уменьшить потери в конденсаторе до 12,83 МВт. Предложена также схема подключения ТНУ в тепловую схему с ПТУ Т-250/300-240.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Распоряжение правительства РФ от 13 ноября 2009 г. N 1715-р «Об утверждении Энергетической стратегии России на период до 2030 года»// "Собрание законодательства РФ", 10.10.2011, № 41 (ч. II).
2. Трубаев П.А. Тепловые насосы: Учебное пособие / П.А. Трубаев, Б.М. Гришко. –Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 142 с.
3. Аникина И. Д. Применение тепловых насосов для повышения энергоэффективности паросиловых ТЭС / И. Д. Аникина, В. В. Сергеев // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 2013. – С. 56-61.

УДК 621.039.577

М.В. Колюшин, Д.А. Николаенков, А.А. Нагибин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

АНАЛИЗ МЕТОДИК НЕЙТРОННО-ФИЗИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ ВОДО-ВОДЯНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ СО СВЕРХКРИТИЧЕСКИМИ ПАРАМЕТРАМИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Актуальность работы. В рамках реализации концепции Generation IV, Россия и ряд других стран разрабатывают конструкции водо-водяных ядерных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя (ВВЭР-СКД) [1].

Особенностью данных ядерных реакторов является то, что в связи со значительными изменениями свойств теплоносителя (воды при сверхкритических параметрах), работа таких реакторов возможна с использованием различных спектров нейтронов, как теплового, так и быстро-резонансного.

К сожалению, в литературе слабо представлены методики нейтронно-физических расчетов этих ядерных реакторов с различными спектрами нейтронов. В рамках данной работы, была сделана попытка анализа методик нейтронно-физических расчетов для двух вариантов водо-водяного ядерного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя – с быстро-резонансным спектром нейтронов и тепловым спектром нейтронов.

Методика нейтронно-физического расчета ядерного реактора с быстро-резонансным спектром нейтронов. При выполнении нейтронно-физического расчета ядерного реактора с быстро-резонансным спектром нейтронов был рассмотрен проект ядерного реактора ВВЭР-СКД с двухфазовой активной зоной с тепловой мощностью 3830 МВт [2].

Конструкция реактора имеет ряд особенностей:

1. Активная зона ядерного реактора делится на две зоны: опускную и подъемную (с точки зрения движения теплоносителя). В подъемной зоне спектр нейтронов – быстрый, а в опускной – резонансный. В результате взаимодействия со средой нейтроны начинают терять свою энергию. Однако стоит вспомнить, что микроскопические сечения взаимодействия со средой сильно зависят от энергии нейтронов и в результате потери энергии, взаимодействия нейтронов будут различными в зоне с быстрым спектром нейтронов и с резонансным спектром.

2. Существенное изменение свойств теплоносителя также вносит свою особенность, в результате этого, данный ядерный реактор нельзя рассматривать с использованием точечной модели реактора, а необходимо рассматривать пространственное распределение нейтронов в активной зоне.

В результате всего этого, использование классических методов нейтронно-физических расчетов не представляется возможным и необходимо использовать специальные методы расчетов, например, метод Карлсона.

Метод Карлсона – численный метод решения кинетического уравнения переноса нейтронов в ядерных реакторах. Данный метод основан на кусочно-линейном представлении потока нейтронов как функции косинуса угла между вектором скорости нейтрона и радиусом.

Для применения данного метода активная зона реактора была разбита на части, и поток нейтронов рассматривался отдельно для каждой из частей.

В результате выполненных 38 итерационных расчетов был получен следующий график сходимости эффективного коэффициента размножения (см. рис.1).

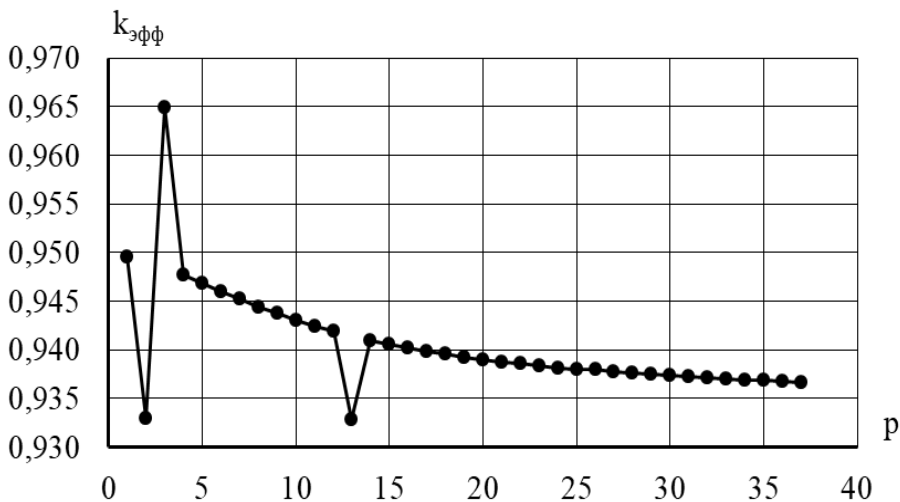


Рис. 1. График сходимости эффективного коэффициента размножения

При анализе графика стоит отметить, что коэффициент размножения меньше единицы, тем самым можно сказать, что реактор находится в подкритическом состоянии

Скорее всего, данное значение коэффициента размножения вызвано тем, что в процессе выполнения расчетов не учитывалось профилирование обогащения ядерного топлива по активной зоне ядерного реактора. В результате по всей зоне учитывалось только одно обогащение топлива.

Методика нейтронно-физического расчета ядерного реактора с тепловым спектром нейтронов. При выполнении нейтронно-физического расчета ядерного реактора с тепловым спектром нейтронов был рассмотрен проект канального ядерного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя с тепловой мощностью 222 МВт [3].

Конструкция реактора имеет следующие особенности:

1. В связи с тепловым сектором нейтронов, активная зона ядерного реактора должна содержать замедлитель и, как в предыдущем случае, в связи с сильно изменяющимися свойствами теплоносителя, использование теплоносителя в качестве замедлителя не представляется возможным. Таким образом, в конструкции реактора необходимо предусмотреть наличие дополнительного замедлителя, например, жидкого или твердого.

2. Существует достаточно сложная проблема с использованием циркония в качестве конструкционного материала, потому что в районе 700°C при взаимодействии циркония с водой будет начинаться парациркониевая реакция. А, например, использование нержавеющей стали достаточно проблематично в связи тем, что нейтроны тепловых энергий хорошо поглощаются нержавеющей сталью, что приводит к необходимости увеличения обогащения топлива.

В результате этого, в конструкции ядерного реактора был использован гидрид циркония в качестве замедлителя. В связи с канальной конструкцией активной зоны – взаимодействия теплоносителя с гидридом циркония при высоких температурах нет, в результате чего возникновение парациркониевой реакции – маловероятно. Гидрид циркония является перспективным кандидатом в качестве замедлителя, потому что его нейтронно-физические характеристики очень близки к воде. Стоит вспомнить, что при нагревании теплоносителя происходит резкое изменение его свойств и в результате можно использовать гидрид циркония для компенсации замедляющей способности теплоносителя, что и было реализовано в конструкции реактора. С учетом такого рода компенсации нет необходимости рассматривать активную зону по частям с учетом изменения свойств замедлителя, а возможно использования классической точечной модели ядерного реактора.

Выводы. При сравнении различных методик нейтронно-физических расчетов водородных ядерных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя (с быстро-резонансным спектром нейтронов и тепловым спектром нейтронов), можно сделать следующие выводы.

В случае быстро-резонансного спектра нейтронов необходимо рассматривать пространственное распределение потока нейтронов, иначе получаемые значения, например по методу Карлсона, будут занижены. Таким образом, в данном случае актуально использование специализированных программных продуктов для моделирования пространственного поведения нейтронов.

В случае теплового спектра нейтронов использование твердого замедлителя, например, гидрида циркония, позволяет компенсировать замедляющую способность теплоносителя и проводить расчеты с использованием точечной модели ядерного реактора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Махин В.М., Чуркин А.Н. Концептуальные предложения по водохлаждаемому реактору со сверхкритическими параметрами (обзор зарубежных и российских разработок SCWR): доклад. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2017. – 18 с.
2. Нагибин А.А. Нейтронно-физический расчет ВВЭР-СКД с быстро-резонансным спектром нейтронов: Выпускная квалификационная работа бакалавра: 14.03.01 Ядерная энергетика и теплофизика. / Нагибин Андрей Алексеевич. – СПб., 2019. – 68 с.
3. Николаенков Д.А. Разработка концепт-проекта ядерного реактора канального типа на сверхкритических параметрах теплоносителя: Выпускная квалификационная работа специалиста: 14.05.01 Ядерные реакторы и материалы. / Николаенков Денис Алексеевич – СПб., 2019. – 61 с.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА СВ-СИНТЕЗА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ МАТРИЦ ДЛЯ ДИСПЕРСИОННОГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА

На сегодняшний день порядка 20% электроэнергии России генерируется атомными электростанциями (АЭС). Традиционно в ядерных энергетических установках используется керамическое ядерное топливо – диоксид урана (UO₂). Однако данный вид топлива обладает существенным недостатком – низким коэффициентом теплопроводности (2,8 Вт/(м·К) при рабочей температуре), что приводит к высоким градиентам температур внутри топливного столба. Таким образом, использование оксидной керамики в качестве топлива накладывает существенные ограничения на КПД энергетических установок и температурные режимы работы ядерной установки. Задача повышения эффективности работы АЭС в первую очередь связана с разработкой новых улучшенных видов ядерного топлива, отвечающих повышенным требованиям безопасности. Одной из перспективных композиций в данный момент является дисперсионное ядерное топливо (ДЯТ) [1].

ДЯТ представляет из себя неактивную матрицу с диспергированными в неё топливными частицами. Матрица обеспечивает интенсивный теплоотвод и выступает барьером для выхода продуктов деления. Высокую эффективность, благодаря своим теплофизическими характеристиками, имеют матрицы, основанные на интерметаллидных соединениях. В ряду переходных металлов важное место занимают Ni и Zr, сплавы на их основе обладают уникальными теплофизическими свойствами, что открывает широкие возможности их использования в качестве матриц для дисперсионного ядерного топлива.

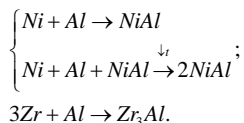
Для получения таких соединений предпочтительно использовать метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), обладающий существенными преимуществами перед традиционными методами порошковой металлургии. СВС – перспективная материаловедческая технология, основанная на способности ряда химических элементов и соединений вступать в экзотермические реакции [2].

Кроме того, важными задачами является моделирование теплофизических и нейтронно-физических особенностей получаемых матриц, а также моделирование процесса их активации нейтронным излучением реакторной установки.

Таким образом, целью данной работы является отработка технологии получения интерметаллидных матриц на основе систем Zr-Al и Ni-Al методом СВ-синтеза.

Синтез осуществлялся на экспериментальном стенде пирометрических исследований закономерностей процесса СВС. Установка представлена на рисунке 1. Подогрев образца и иницирование реакции синтеза производилось с помощью вольфрамовой нити, подключенной к линейному преобразователю тока. Регистрация температурных режимов проводилась с помощью вольфрам-рениевых термопар с записью данных персональным компьютером.

Шихта подготавливалась из расчета на прохождение следующих экзотермических реакций [3]:



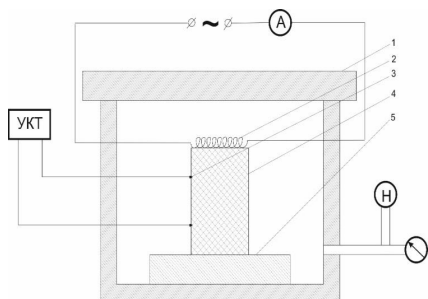


Рис. 1. Экспериментальная установка для получения СВС материалов:
 1 – крышка; 2 – нагревающий элемент; 3 – комплекс термопар; 4 – синтезируемый образец;
 5 – несгораемая подставка

После экспериментальной отработки образцы подвергались рентгенофазовому анализу (РФА) на дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Результаты РФА представлены на рисунках 2 и 3.

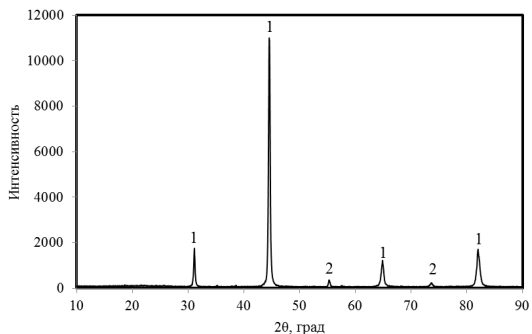


Рис. 2. Фазовый состав образца на основе системы Ni-Al:
 1: NiAl – 99,4%; 2: Al₂O₃ – 0,6%

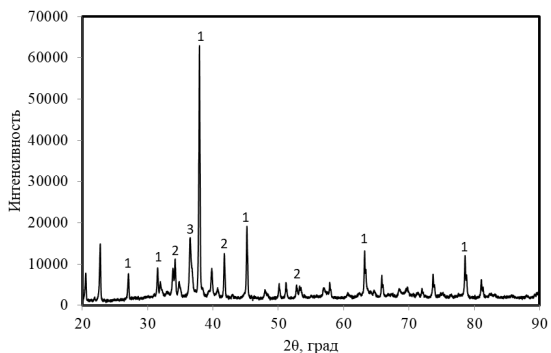


Рис. 3. Фазовый состав образца на основе системы Zr-Al:
 1: Zr₃Al – 74,3%; 2: ZrAl₂ – 18,7%; 3: αZr – 7,0%

На следующем шаге работы осуществлялось теплофизическое моделирование в условиях эксплуатации ДЯТ в реакторной установке ВВЭР-1000. Моделирование проводилось в САПР SolidWorks. Результаты моделирования приведены на рисунке 4.

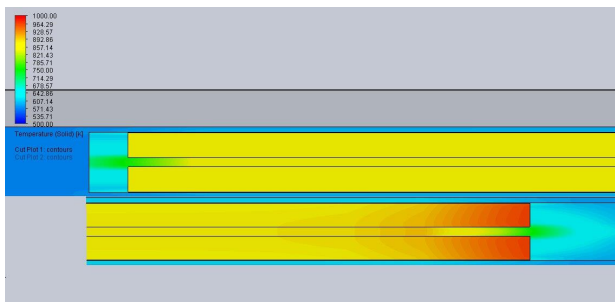


Рис. 4. Результаты теплофизического моделирования

По результатам нейтронно-физического моделирования в программном комплексе MCU был получен спектр плотности потока нейтронов для данного вида топлива при условии его эксплуатации в РУ ВВЭР-1000, что представлено на рисунке 5.

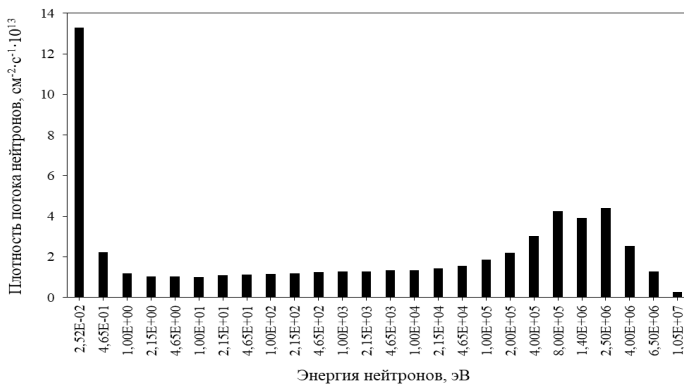


Рис. 5. Спектр плотности потока нейтронов

Расчетное значение запаса реактивности составило 26,199%. Данный запас реактивности способен обеспечить эксплуатацию реактора на мощности в течении длительности всей кампании топлива.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дисперсионные твэлы: в 2 т. / Самойлов А. Г., Волков В. С., Солонин М. И. – М.: Атомиздат, 1982. – 448 с.
2. Рогачев, А. С. Горение для синтеза материалов: введение в структурную макрокинетику / А. С. Рогачев, А. С. Мукасян. – М.: Физматлит, 2013. – 400 с.
3. Диаграммы состояния двойных металлических систем: Д44 Справочник: В 3 т.: Т.1/ Под общ. ред. Н. П. Лякишева. – М: Машиностроение, 1996. – 992 с.

ОБОСНОВАНИЕ ПОДКРИТИЧНОСТИ КОРИУМА В УСТРОЙСТВЕ ЛОКАЛИЗАЦИИ
РАСПЛАВА ДЛЯ СТАЦИОНАРНОЙ ТОПЛИВНОЙ ЗАГРУЗКИ ВВЭР

Введение. В настоящий момент одной из основных задач ядерной энергетики является обеспечение безопасности проектируемых и действующих ядерных установок. В частности, необходимо не только минимизировать вероятность аварий, но и свести к минимуму их возможные последствия. Среди спектра возможных аварий выделяются тяжелые запроектные аварии, сопровождающиеся расплавлением активной зоны с образованием кориума – смеси материалов, содержащихся в реакторе. Для минимизации последствий подобных аварий применяются устройства локализации расплава (УЛР), заполненные жерственными материалами (ЖМ) [1].

Использование УЛР должно обеспечить удержание расплавленных материалов в пределах корпуса ловушки, исключая, таким образом, распространение радиоактивных материалов за пределы контаймента.

При анализе процесса удержания кориума в УЛР важным вопросом является обеспечение подкритического состояния расплава на всех этапах, начиная с попадания в УЛР и заканчивая полным остыванием. Современные расчетные программы позволяют рассмотреть широкий спектр моделей возможных состояний расплава, обеспечивая при этом учет реальной геометрии УЛР. Одной из программ, открывающих данные возможности, является TDMCC [2, 3], реализующая метод Монте-Карло для моделирования переноса нейтронов.

Особый интерес для анализа представляет стационарная загрузка активной зоны, поскольку именно в данном режиме загрузки реактор работает большую часть своего срока службы. Выглядит уместным вопрос: какое из возможных состояний топлива на момент аварии – свежее после перегрузки или отработавшее, готовое к перегрузке – реализует больший коэффициент размножения нейтронов K_{eff} внутри УЛР? При том, что свежее топливо содержит большее количество изотопа ^{235}U , нельзя забывать, что в отработавшем топливе выше содержание изотопа ^{239}Pu , также являющегося делящимся материалом. В качестве примера рассматривается активная зона проекта ЛАЭС-2.

Цель работы. Обосновать подкритичность расплава в УЛР станции ЛАЭС-2 для стационарной топливной загрузки, сравнить поведение систем со свежеперегруженным топливом и топливом непосредственно перед перегрузкой.

В ходе своего жизненного цикла внутри УЛР кориум проходит две существенных стадии – гомогенную и гетерогенную. Первая стадия предполагает попадание кориума в УЛР, смешивание его с ЖМ и инверсию с подачей воды на поверхность расплава. Вторая же стадия представляет собой растрескавшийся в результате остывания расплав с пустотами, заполненными водой. Интерес для рассмотрения в вопросе безопасности представляет именно вторая стадия, поскольку вода, попадающая в образующиеся пустоты, «смягчает» спектр нейтронов – увеличивается концентрация тепловых нейтронов, – что может спровоцировать вторичную критичность расплава. Первая же стадия, хотя она и интересна для полного описания картины, не представляет опасности со стороны вторичной критичности – ввиду ряда факторов расплав на данной стадии находится в глубоко подкритическом состоянии.

ЖМ, содержащиеся в УЛР и перешедшие в кориум, а также материалы оболочек твэлов, ведут лишь к снижению K_{eff} . Для оценки возможного предела K_{eff} для гомогенного

кориума рассмотрен, в том числе, случай чистого топлива, не содержащего никаких примесей. Результаты расчетов представлены на рисунке 1. Температура кориума варьировалась в широких пределах, что позволяет судить о поведении K_{eff} в процессе остывания.

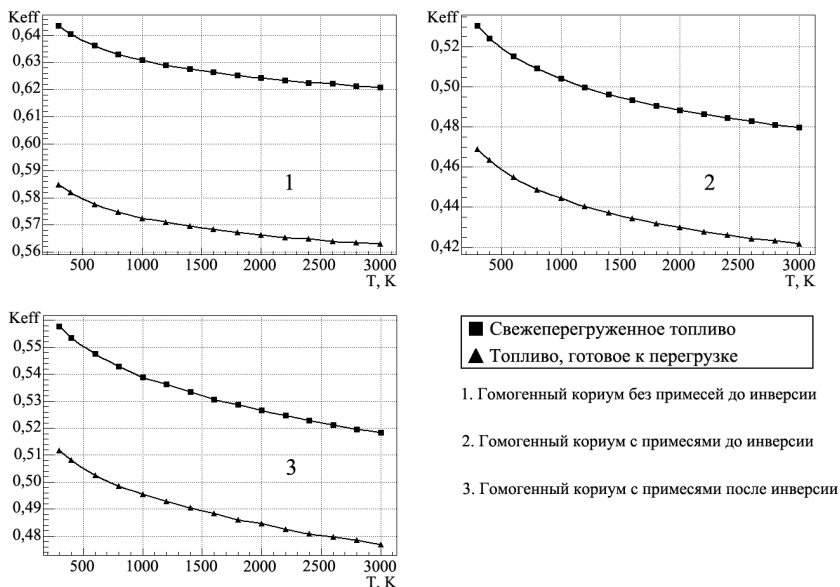


Рис. 1. Зависимость коэффициента размножения нейтронов K_{eff} от температуры для гомогенного кориума

Из рисунка 1 видно, что K_{eff} растет с понижением температуры. В таблице 1 приведены максимальные значения K_{eff} (при 300 К) для всех случаев.

Таблица 1. Результаты расчета K_{eff} для гомогенного кориума.

Топливо	Чистое топливо до инверсии	С примесями до инверсии	С примесями после инверсии
Свежее	0,643618	0,530578	0,557775
Отработавшее	0,584947	0,468902	0,511673

В то время как гомогенная система находится в глубоко подкритическом состоянии, гетерогенная может достигнуть критического состояния. Поскольку на сегодняшний день отсутствуют достоверные данные об объеме и размерах образующихся пустот в остывшем кориуме, требуется варьировать оба параметра в широких пределах для получения реалистичной картины возможных состояний. На рисунке 2 представлено распределение K_{eff} в гетерогенном кориуме для свежего и отработавшего топлива.

Из рисунка 2 видно, что как в свежем, так и в отработавшем топливе, существует возможность достижения надкритического состояния, хотя K_{eff} для отработавшего топлива ниже. Для снижения значения K_{eff} необходимо добавление в ЖМ вещества, являющегося сильным поглотителем нейтронов. Таким веществом является гадолиний, добавляемый к

ЖМ в виде Gd_2O_3 . Для определения необходимого количества оксида гадолиния требуется провести расчеты, варьируя его содержание до достижения системой максимального $K_{eff} \approx 0,9$, что, в свою очередь, позволит говорить о стабильной подкритичности системы (с учетом неопределенности расчетов 3%). В таблице 2 приведены значения максимального K_{eff} для свежего и отработавшего топлива без добавления Gd_2O_3 к жертвенным материалам, а также с добавлением Gd_2O_3 (в долях от массы жертвенных материалов для случая свежего топлива).

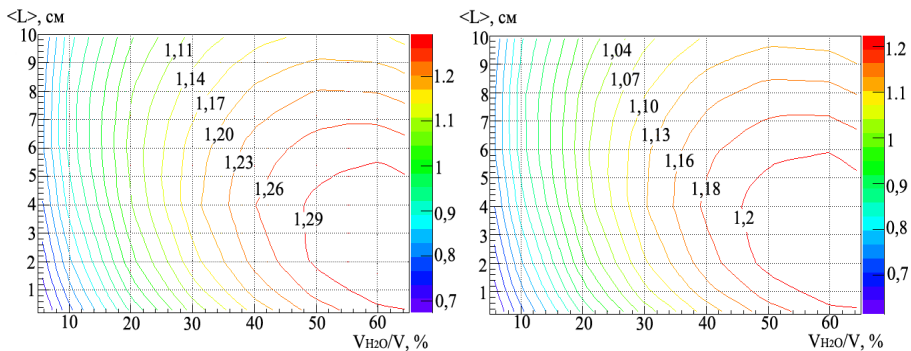


Рис.2. Распределение K_{eff} в гетерогенном топливе из свежего (слева) и отработавшего (справа) топлива в зависимости от среднего размера пустот и их доли от общего объема среды

Таблица 2. Максимальные значения K_{eff} , реализуемые в гетерогенном топливе. Соответствующие размеры пустот, их доля, и содержание Gd_2O_3 в % от массы ЖМ.

	Отр. топл.	Св. топл.	0,1% Gd_2O_3	0,15% Gd_2O_3	0,2% Gd_2O_3	0,25% Gd_2O_3
Max K_{eff}	1,228068	1,295770	1,040362	0,962127	0,904887	0,861520
$\langle L \rangle$, см	2,895	2,552	2,846	2,993	2,993	2,993
V_{H_2O}/V , %	59,9	61,4	54,2	47,9	43,4	39,2

Расчеты показали, что требуемые значения K_{eff} достигаются при добавлении Gd_2O_3 к ЖМ в количестве 0,2% от их массы.

Вывод. В работе обоснована подкритичность расплава в УЛР на всех стадиях его жизненного цикла, для достижения которой требуется добавление Gd_2O_3 к ЖМ в количестве порядка 0,2% от их массы. При сравнении поведения расплава, полученного из свежеперезгруженного топлива и расплава, полученного из топлива, готового к перегрузке, получено, что расплав свежего топлива реализует большее значение K_{eff} в УЛР, а значит именно его нужно учитывать при анализе безопасности ВВЭР.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Асмолов В.Г., Сулацкий А.А., Бешта С.В. и др. Взаимодействие расплава активной зоны ядерного реактора с оксидным жертвенным материалом устройства локализации для АЭС с ВВЭР // ТВТ. – 2007. – Т. 45. – № 1. – С. 28–37.
2. Житник, А.К., Семенова, Т.В., Рослов, В.И., Огнев, С.П., Иванов, Н.В., Артемьева, Е.В. Программа TDMCC (Time-Dependent Monte Carlo Code). // Свидетельство о государственной регистрации №2010614412.: ФГУП «РФЯЦ ВНИИЭФ», 2010.
3. Аттестационный паспорт программного средства TDMCC // №407 - Москва: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор), 2016.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕСНЕНИЯ
В СОСТАВЕ АЭС БУШЕР (ИРАН)

Введение. Дефицит пресной воды постепенно увеличивается во всём мире. Ожидается, что к середине 21 века он вызовет глобальную перестройку мировой экономики, существенно увеличивая экспорт пресной воды. Для рассматриваемого региона, Ближнего Востока, данная проблема стоит достаточно остро. Однако, по причине своего прибрежного расположения такие страны, как Иран, имеют огромные запасы морской воды. Оптимальным решением для выхода из данной неблагоприятной ситуации может стать опреснение. Так, в Саудовской Аравии производится более 180 литров на душу населения в день, а в ОАЭ – около 1000 литров в сутки на одного человека. Этот объем в 150 раз выше, чем объем производимой пресной воды на душу населения в Иране [1, 2].

Цель работы. Сравнение различных методов опреснения в составе АЭС Бушер. Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) Определить методы опреснения, которые возможно использовать на базе АЭС Бушер.
- 2) Рассчитать основные технико-экономические показатели выбранных методов опреснения.
- 3) Проанализировать полученные результаты.

Описание работы. Сегодня термические и мембранные методы являются двумя основными процессами опреснения морской воды. Таким образом, в данной работе рассмотрены методы: многоколонного опреснения (MED), многоступенчатого мгновенного выпаривания (MSF) и обратного осмоса (RO). Данные способы опреснения подходят для производства пресной воды в больших, так называемое крупнотоннажное опреснение, и средних масштабах. Гибридные же системы опреснения, которые сочетают термические и мембранные опреснительные процессы с системой производства электроэнергии, в настоящее время рассматриваются в качестве надлежащей экономической альтернативы [3].

Гибридные методы сложны для расчета и требуют учета большего количества факторов, влияющих на работу как опреснительной установки, так и всей электростанции в целом. Повышенный интерес к установкам обратного осмоса, как «обещавший» более низкие энергозатраты и стоимость получаемой воды, не вполне оправдал себя. Однако он не сильно отстаёт от установок мгновенного вскипания и может являться альтернативой при необходимости [4]. По этим причинам мы проводим сравнительный анализ указанных выше MED, MSF и RO.

Моделирование проводилось в программном пакете DEEP (The Desalination Economic Evaluation Program, разработки МАГАТЭ), позволяющем оценить на основе задаваемых технических параметров станции и опреснительной установки показатели всего комплекса целиком. Методика расчета в данном пакете описана в [5]. Для получения более детальной картины по методам производства пресной воды расчет производился для двух вариантов производительности опреснительной установки – 50000 и 100000 м³/сут.

Основные исходные данные по АЭС и морской воде следующие: тепловая мощность энергоблока – 3012 МВт, коэффициент полезного действия – 33 %, общая минерализация морской воды – 4,2 %, среднегодовая температура охлаждающей воды – 25 °С [2]. По итогам расчетов была составлена таблица сравнения технико-экономических показателей различных методов опреснения, в зависимости от производительности опреснительной установки (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение технико-экономических показателей методов опреснения

Метод опреснения	MED	MSF	RO	MED	MSF	RO
Электростанция						
Производительность м ³ /сут	50000			100000		
Общие капитальные затраты, \$/кВт-час	7255					
Годовые капитальные затраты, \$/кВт-час	449					
Ежегодные эксплуатационные расходы, \$/кВт-час	0,02					
Суммарные годовые расходы, М\$	558					
Стоимость энергии, \$/кВт-час	0,091					
Опреснительная установка						
Суммарная стоимость энергии, \$/м ³	0,63	1,28	0,56	0,63	1,28	0,56
Суммарные операционные и эксплуатационные расходы, \$/м ³	0,14	0,14	0,22	0,13	0,13	0,21
Общие эксплуатационные расходы, \$/м ³	0,76	1,42	0,57	0,75	1,41	0,56
Суммарные годовые расходы, мил\$	20,80	30,55	15,83	26,91	60,70	31,3
Суммарная стоимость воды, \$/м ³	1,407	2,066	0,963	1,394	2,053	0,95
Время окупаемости, лет	14,8	15,3	14,5	15	16	14,4
Общая рабочая температура водонапорной установки, °С	35	75	-	35	75	-
Коэффициент выхода продукции	11,20	9,06	-	11,20	9,06	-
Общее использование энергии станции, МВт	3,38	6,07	7,95	6,75	12,3	15,91
Расход подпиточной воды, м ³ /сут	100000	100000	-	200000	200000	-

Результаты. В ходе анализа данных, представленных в таблице 1, можно сделать вывод о том, что производство пресной воды на АЭС – выгодно, так как, производя,

например, 50 000 м³ в сутки, мы сможем обеспечить чистой пресной водой всё населения города Бушер, находящегося недалеко от станции, а именно 223 литра на душу населения.

Методом опреснения, требующим наибольшее количество электроэнергии, является обратный осмос, однако, при использовании этого метода не требуется забор тепла в установку для испарения воды, и, как следствие, стоимость конечного продукта уменьшается.

Также стоит отметить, что с ростом производительности, возрастает энергетическая потребность установки. Более точно зависимость этих показателей можно наблюдать на рисунке 1.

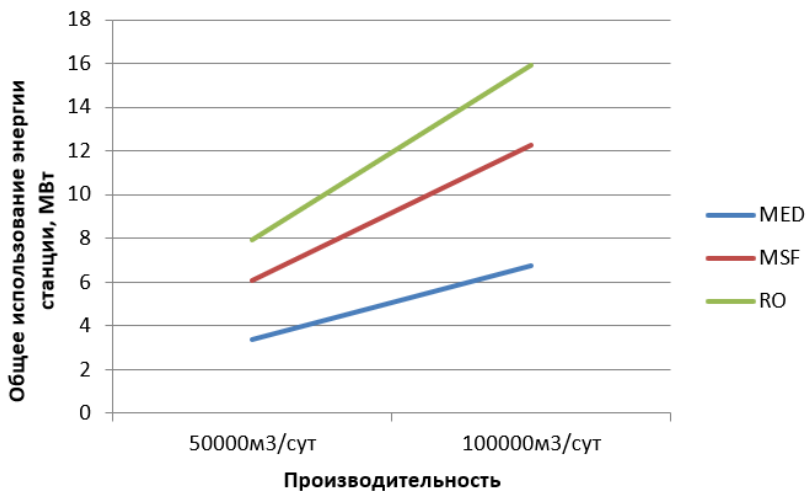


Рис. 1. Зависимость использованной энергии на станции от производительности установки

Выводы. В ходе работы были определены наиболее выгодные методы опреснения, а также получены их технико-экономические показатели. Был проведён анализ результатов, в котором была доказана актуальность использования установки опреснения на базе АЭС Бушер в целом, а также, были сравнены и показаны основные зависимости наиболее важных для данной установки характеристик. Результаты исследования могут оказаться полезными при проведении дальнейших работ по определению целесообразности использования атомных станций для опреснения, причём с учётом как экономического, так и технического аспектов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. S. Ahuja, Sustaining Water, the World's Most Crucial Resource // Chemistry and Water, (2017) 1-22 с.
2. А. Ю. Новиков, Е. Д. Федорович, М. В. Коношин Исследование возможности производства пресной воды на новых энергоблоках АЭС Бушер (Иран). Выпускная квалификационная работа магистра. – СПбГПУ, 2018 – 60 с.
3. Наими А., Рассохин В. А. Моделирование и технико-экономическая оптимизация газотурбинных установок для опреснения морской воды. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. — СПбГПУ, 2017 – 139 с.
4. Слесаренко В.Н. Опреснительные установки – Владивосток: ДВГМА, 1999 – 244 с,ил.
5. DEEP 5 User Manual, 2013 - International Atomic Energy Agency

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ НА РАЗЛИЧНЫХ ХЛАДАГЕНТАХ В РЕАЛЬНЫХ ПАРОТУРБИННЫХ ЭНЕРГБЛОКАХ

Введение. Энергетическая эффективность – ключевой вопрос оптимизации и модернизации промышленности сегодня, особенно в условиях энергоемкости продукции. Количественно это выражается в снижении удельных затрат условного топлива на выработку электроэнергии и отпуск теплоты [1], применительно к ТЭЦ. Решением данной проблемы может являться применение установок для утилизации недоиспользованной (сбросной) теплоты, например, теплонасосных установок (ТНУ). Применение ТНУ не нашло популярности в РФ из-за дешевизны энергоресурсов и «консервативных» подходов в вопросах теплофикации. Несмотря на перспективы применения ТНУ в теплофикационном цикле, возникает вопрос ее влияния на режимы работы оборудования и ТЭЦ.

Цель работы – определить эффективность включения парокомпрессионной ТНУ с различными хладагентами в составе энергоблоков (ЭБ) с турбинами ПТ-80 и Т-250.

Задачи. Для достижения поставленной цели необходимо:

1. предложить схемное решение включения ТНУ для подогрева ОСВ;
2. создать имитационные модели реальных ЭБ с турбинами ПТ-80 и Т-250 без и с ТНУ;
3. сравнить эффективность работы ТНУ в схемах подогрева ОСВ паротурбинных ЭБ с турбинами ПТ-80 и Т-250 для различных рабочих тел (хладагентов);
4. произвести анализ влияния включения ТНУ на экономичность работы паротурбинных установок (ПТУ).

Анализ влияния ТНУ на режимы работы ТЭЦ выполнялся посредством имитационного моделирования в САПР «United Cycle» (Россия). В работе были смоделированы две схемы энергоблоков с ПТУ ПТ-80 и Т-250 по исходным данным производителей оборудования. Созданные модели позволяют рассчитывать любой стационарный эксплуатационный режим работы оборудования. В качестве расчетного режима, при котором происходит включение ТНУ и сравнение показателей, был выбран зимний режим с малыми отопительными нагрузками [2].

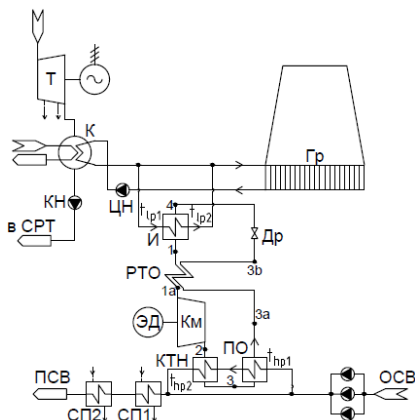


Рис. 1. Схема включения ТНУ с РТО и ПО для подогрева ОСВ

В качестве источника низкопотенциальной теплоты (ИНТ) для ТНУ была выбрана охлаждающая вода на выходе из конденсатора ПТУ, а потребителем теплоты – ОСВ до сетевых подогревателей ЭБ (рис.1). В работе реализуется вариант использования теплоты от ТНУ для увеличения отпуска теплоты от ТЭЦ (суммарная электрическая нагрузка ТЭЦ и суммарный расход топлива оставались неизменными) [3, 4].

Рассмотрим три популярные марки хладагентов для применения их в ТНУ. Популярный хладон R12 (группа опасности «А») из-за своей озонопасности теряет массовость и повсеместно заменяется, в большинстве случаев, озонобезопасным хладоном R134а («С»). Хладон R22 принят для рассмотрения промежуточной группы опасности («В»).

Эффективность работы ТНУ на различных хладагентах определялась сравнением следующих показателей установок: коэффициента преобразования энергии (КПЭ) (формула 1, табл. 1) и величиной затрат собственных нужд электроэнергии на ТНУ, определяющей мощностью компрессора (формула 2, табл. 1).

Коэффициент преобразования теплоты (КПЭ):

$$\mu = \frac{0,98 \frac{273+t_{env}}{273+t_k} (h_{1a} - h_{3a}) + (h_{2a} - h_{1a})}{h_{2a} - h_{1a}}, \quad (1)$$

где: h_1, h_{2a}, h_3 – энтальпии в соответствующих точках схемы (рис.1); t_{env} – температура окружающей среды, °С; t_k – температура конденсации хладагента, °С.

Мощность компрессора ТНУ, МВт:

$$N_K = \frac{Q_{ТНУ}}{\eta_M \cdot \eta_{\varepsilon}} \cdot \frac{h_{2a} - h_{1a}}{0,98 \frac{273+t_{env}}{273+t_k} (h_{1a} - h_{3a}) + (h_{2a} - h_{1a})}, \quad (2)$$

где: η_M и η_{ε} – механический и электрический КПД электродвигателя компрессора (принимаются равными 0,95 и 0,9, соответственно); $Q_{ТНУ}$ – мощность ТНУ, МВт.

Таблица 1. КПЭ и мощность компрессора ТНУ при различных хладагентах.

Хладагент	ПТ-80		Т-250	
	КПЭ	N _к , МВт	КПЭ	N _к , МВт
R12	5,35	2,84	5,50	2,76
R22	5,13	2,97	5,21	2,92
R134а	5,28	2,88	5,45	2,79

Из постоянства мощности ТНУ следует, что удельные затраты топлива на производство т/э постоянны для всех рассматриваемых вариантов хладагентов (R12, R22, R134а) и равны 104,12 г/кВт·ч и 117,91 г/кВт·ч для ЭБ с ПТУ ПТ-80 и Т-250, соответственно. Результаты расчетов удельных расходов топлива представлены в таблице 2 и на графике (рис.2).

Таблица 2. Удельные расходы топлива для ЭБ с ПТУ ПТ-80 и Т-250 с ТНУ на разных хладагентах.

	ПТ-80		Т-250	
	Удельный расход топлива на производство т/э, г/(кВт·ч)	Удельный расход топлива на производство э/э, г/(кВт·ч)	Удельный расход топлива на производство т/э, г/(кВт·ч)	Удельный расход топлива на производство э/э, г/(кВт·ч)
R12	104,1	270,4	117,9	198,5
R22		270,9		198,6
R134а		270,5		198,5

Экономический эффект модернизации системы теплофикации рассчитан из соотношения полученной выручки от работы ТНУ и соответствующего появления затрат э/э на привод компрессора ТНУ по тарифам на энергоносители компании ПАО «ТГК-1» в 2019 году (формула 3) по эксплуатационным характеристикам, без учета капитальных затрат, издержек, рисков и амортизационных отчислений. Результат расчет представлен в таблице 3.

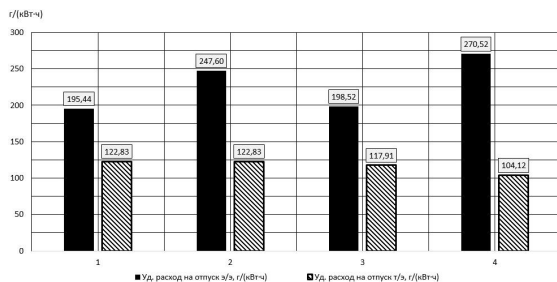


Рис. 2. Удельные расходы топлива на производство электрической и тепловой энергии для ЭБ с ПТУ ПТ-80 и Т-250 без и с включением ТНУ на хладагенте R134a в схему подогрева ОСВ теплосети (1, 2 – Т-250 и ПТ-80; 3, 4 – Т-250 и ПТ-80 с ТНУ).

Экономический эффект от внедрения ТНУ:

$$ПЭФ = \Delta Q_T \cdot C_T - \Delta \mathcal{E}_{CH} \cdot C_{CH}, \quad (3)$$

где ΔQ_T – приращение теплоты в результате внедрения ТНУ, МВт; $\Delta \mathcal{E}_{CH}$ – повышение затрат электроэнергии на СН, МВт; C_T – тарифная стоимость тепловой энергии на отпуск, руб./МВт; C_{CH} – тарифная стоимость электрической энергии на СН, руб./МВт.

Таблица 3 – Квартальная экономия денежных средств включением ТНУ в схему подогрева ОСВ.

	Экономия денежных средств, млн. руб./квартал	
	ПТ-80	Т-250
R12	9,64	9,87
R22	9,29	9,43
R134a	9,54	9,79

Выводы. Анализ показателей эффективности работы и показателей экологической безопасности показал преимущества применения в ТНУ хладагента R134a для внедрения в схему подогрева ОСВ энергоблоков. Включение ТНУ большой мощности (13 МВт) с данным хладагентом дает экономию в квартал до 9,54 и 9,79 млн. рублей для ЭБ с ПТУ ПТ-80 и Т-250, соответственно.

ЛИТЕРАТУРА:

- И.Д. Аникина и др. Применение тепловых насосов для повышения энергоэффективности паросиловых ТЭС. «Научно-технические ведомости СПбГПУ». Выпуск 3 (178), с.56-61 (2013).
- V.V. Sergeyev and etc. “Heat pumps application in flow-sheet of heat generation at thermal power plants”. *Int. Sc. Journal for Altern. Energy and Ecology* 3-4 (191-192), PP.39-49 (2016).
- I.D. Anikina. Influence of heat pumps inclusion in deaeration scheme of heating network make-up water on the operating modes of the TPP. “ЕЕСЕ-2018”. MATEC Web of Conferences 245, 15004 (2018).
- N.T. Amosov and etc. Use of heat pumps in turbogenerator hydrogen cooling systems at thermal power plant. *Inter. Journal of Hydrogen Energy* 42-PP. 636-642 (2017)

МЕТОДИКА ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ И УТИЛИЗАЦИИ ОСОБО ОПАСНЫХ И ТОКСИЧНЫХ ОТХОДОВ ПОЛИГОНА «КРАСНЫЙ БОР»

Введение. Проблема обращения с отходами становится все более серьезной в последние годы [1 – 3]. Отчуждаемые ввиду отсутствия необходимых мероприятий и методик обращения территории разрастаются и представляют реальную угрозу жизни и здоровью людей. Отдельный блок массива отходов – особо опасные и токсические отходы, которые, на сегодняшний день, не подвергаются никакой обработке, а попросту захораниваются на полигонах, примером является «Красный Бор» (Ленинградская область) – крупнейший в СЗФО, действующий уже 40 лет и хранящий более 2 млн тонн токсичных отходов – крупная экологическая угроза Северной Столице («Токсичный Чернобыль»). Текущее состояние данного полигона требует незамедлительного вмешательства и мероприятий по повышению уровня экологической безопасности, однако, проводимые работы по огораживанию территории и ультрафиолетовой очистке сточных вод не решают главную проблему наличия токсичных отходов и не обеспечивают должный уровень безопасности. В данной работе предлагается инновационная система обращения с особо опасными и токсичными отходами полигона «Красный Бор» с их утилизацией, обезвреживанием и последующим захоронением.

Цель работы – разработка методики по утилизации, обезвреживанию и захоронению особо опасных отходов полигона «Красный Бор».

Задачи для достижения поставленной цели следующие:

1. проанализировать текущее состояние отрасли обращения с особо опасными и токсичными отходами полигона «Красный Бор»;
2. провести классификацию морфологического состава отходов полигона «Красный Бор» по химическому составу и классу биохимической опасности (экологической опасности);
3. сформулировать методику обращения с особо опасными и токсичными отходами;
4. предложить схему установки по утилизации и обезвреживанию особо опасных отходов.

Захоронение особо опасных и токсичных отходов на полигоне «Красный Бор» выполняется с изоляцией за счет использования строительного-оградительных конструкций (заборы, дамбы), саркофагов (купола), природных особенностей (глубокие подземные воды, гидроизолирующие почвы, слабая активность ветров). Каждый из приведенных методов повышает эффективность обращения с опасными отходами, но не является непосредственно процедурой утилизации, так, в рамках мероприятий по обезвреживанию отходов на полигоне выполняется ультрафиолетовая очистка и фильтрация сточных вод, что позволяет частично сдерживать интенсивное распространение ядовитых веществ, однако, не решает проблему наличия данных загрязнителей и постоянного воздействия на окружающую среду [4].

За последние несколько лет на полигоне произошло по меньшей мере 5 крупных пожаров с выбросом тонн токсичных отходов в атмосферу (столб дыма достигал Санкт-Петербурга), прорывы дамб и размывания ограждений, помимо прочего, отходы преодолели естественный природный барьер в виде глин и попали в подземные воды.

Необходимость более эффективного обращения с опасными отходами, то есть, утилизации их и обезвреживания, продиктована также экономически: вышеперечисленные методы борьбы с загрязнениями дорогостоящие и временные, тогда как предполагаемые мероприятия позволят раз и навсегда ликвидировать отходы.

Инвентаризация отходов на полигоне в России не проводилась, была исследована только часть отходов в открытых картах-котлованах №64 и №68 (информация закрыта).

Точно известно, что на полигон в разное время и в разных количествах свозились: органические (отходы нефтехимических производств, полимеры, биологические отходы) и неорганические (химреагенты, ртутные компоненты, гальванические шламы, аккумуляторы, резинотехнические изделия) – многообразие представленных веществ с разным химическим составом не позволяет оценить возможные реакции и подобрать точечный подход, потому требуется универсальный способ утилизации и обезвреживания для всех вышеперечисленных отходов.

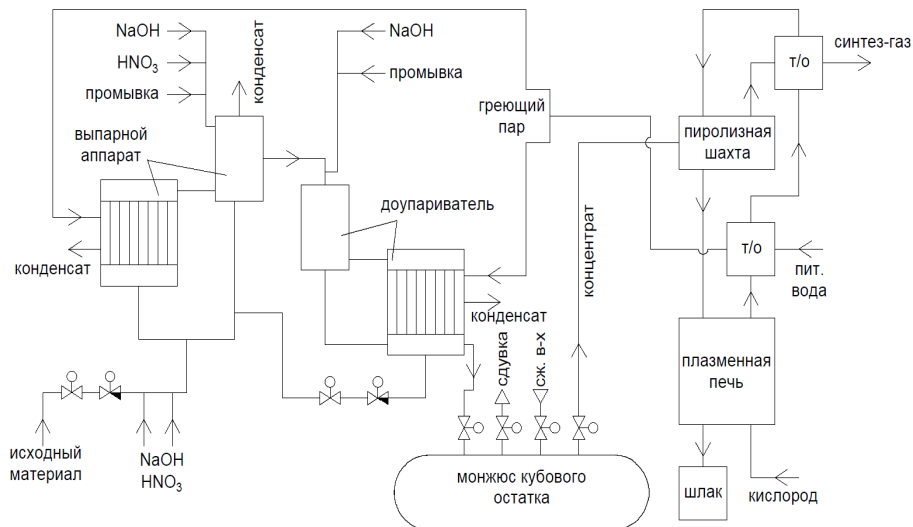


Рис. 1. Схема утилизационной установки

В качестве универсализированной установки рассматривается компоновка, включающая выпарную установку с доупаривателем и плазменно-пиролитическую установку (рис.1). Обоснованием для данного решения является необходимость концентрации токсичных отходов для их последующей утилизации, что наиболее эффективно выполняется в выпарной установке с доупаривателем (происходит выпаривание жидкости и осушение отходов), кубовый остаток – концентрат опасных веществ в отходах – поступает в плазменно-пиролитическую установку, где сначала проходит низкотемпературный пиролиз в котле, после чего, обедненный по органике и воде, идет в плазменную печь. Стекловидный шлак – не утилизируемый остаток – направляется на консервацию и захоронение. Уходящие газы из печи через теплообменные аппараты, генерируя греющий пар для выпарной установки и охлаждая синтез-газ, поступают в пиролизный котел и являются источником теплоты для реакции. Охлажденный синтез-газ после пиролизного котла и теплообменника поступает к потребителю (пригоден для использования в ДВС и котлах).

Плазменная установка подходит для утилизации отходов смешанного и сложного состава за счет использования плазмотронов постоянного тока (повышают температуру

реакции до 1500-1800 °С) и позволяет получить шлаковый остаток, сохраняющий целостность десятки лет, пригодный к длительному захоронению.

На выходе из пиролизной части установки – синтез-газ – результат газификации концентрата отходов, состав которого может колебаться, как и его теплотворная способность (в работе не рассматриваются варианты газификации водяным паром и чистым кислородом ввиду дороговизны и сложности) [5].

Важный аспект предполагаемой комплексной установки по утилизации и обезвреживанию токсичных отходов – поддержание режима как по температуре, так и по содержанию кислорода, ограничивающий выход неконденсирующихся газов до СО и Н₂.

Преимущества данной утилизационной установки:

- позволяет утилизировать и обезвреживать особо опасные и токсичные отходы;
- высокая экологичность процессов ввиду отсутствия прямого сжигания отходов;
- генерация синтез-газа с возможностью его последующего использования;
- неутилизируемый остаток несоизмеримо мал по сравнению с исходными отходами;
- высокая энергетическая эффективность установки ввиду интегрированных систем утилизации сбросной теплоты.

Принимая во внимание стоимость захоронения и обращения с особо опасными и токсичными отходами (35 000 рублей и более), масштабы захороненных отходов (свыше 2 000 тонн), количество продуцируемых 1 человеком (по данным ООН, в развитых странах – 70 кг/(чел•год)) и численность населения СЗФО (13 972 070 человек) [6], данная процедура обходится порядка 34,3 млрд рублей, без учета затрат на продолжительное захоронение отходов. Подчеркнем, колоссальные затраты не решают проблему, позволяют лишь бороться с последствиями.

Выводы. На основании проведенного исследования для решения проблемы обращения с особо опасными и токсичными отходами полигона «Красный Бор» предлагается интеграция комплексной установки по утилизации и обезвреживанию, состоящей из выпарной установки с доупаривателем (концентратор) и плазменно-пиролитической установки (пиролизный котел и плазменная печь). Под воздействием высокой температуры выделяется синтез-газ, пригодный к использованию, и стекловидный шлак, пригодный к длительному и безопасному хранению.

ЛИТЕРАТУРА:

1. И.Д. Налетов, Н.Т. Амосов. Влияние процесса утилизации твердых бытовых отходов на окружающую среду / Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1. – СПб. : Изд-во Политехн. Ун-та, 2017. – 248 с.;
2. И.Д. Налетов, О.В. Новикова, Н.Т. Амосов. Создание промышленного кластера обращения с отходами // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт промышленного менеджмента, экономики и торговли. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018г.;
3. И.Д. Налетов, О.В. Новикова, Н.Т. Амосов. Создание промышленного кластера обращения с отходами, его перспективы и преимущества // Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Лучшие доклады. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – 453 с.;
4. ГОСТ Р 56598-2015 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Общие требования к полигонам для захоронения отходов;
5. Алешина А.С., Сергеев В.В. Газификация твердого топлива: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – 202 с.;
6. Официальный сайт полномочного представителя Президента РФ в СЗФО. СЗФО [Электронный ресурс]: <http://szfo.gov.ru/district/> (дата обращения: 09.10.2019 г.)

СОЗДАНИЕ И ГРАДУИРОВКА ПЕРВИЧНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ
КОМПОЗИЦИИ МЕДЬ-НИКЕЛЬ

Изучение теплообмена невозможно без измерения теплового потока Q и его плотности $q = dQ/dF$. По сравнению с измерением температуры, тепловой поток измеряют крайне редко. Это связано, в первую очередь, с отсутствием надежных и быстродействующих датчиков теплового потока. Гетерогенные градиентные датчики теплового потока (ГДТП) созданы на основе косослойных композиций разных металлов, сплавов и полупроводников.

В СПбПУ созданы, отградуированы и используются датчики на основе композиций сталь+никель, хромель+алюмель, кремний+алюминий. Для создания анизотропии термоэлектрических свойств необходимо обеспечить диффузионную сварку слоев особым образом. Рассмотрим технологию на примере композиции медь+никель. Пакет из медной ($\delta_1=0,05$ мм) и никелевой фольги ($\delta_2=0,10$ мм), обезжиривается, помещается в печь и сдавливается с усилием 15 кПа. Заготовку нагревают и выдерживают при температуре 250-300 °С 30 мин; затем продолжают нагрев до температуры 820 °С. При этой температуре заготовка находится в печи 3,5 ч, после чего остывает вместе с печью.

Сваренную заготовку нарезают на электроискровом станке на отдельные датчики. Спекание и нарезка композиции осуществлялась по методике, разработанной в лаборатории кафедры «Теплофизика энергетических установок» ФГАОУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» [1].

Полученные ГДТП необходимо отградуировать в диапазоне рабочих температур. ФГБОУ «СПбГПУ», ОАО «НПП ЭТАЛОН» и ВНИИМ им. Д. И. Менделеева совместно создали специальный градуировочный стенд [2, 3].

Конструкция стенда имела недоработки. Клеммы нагревательного элемента, провода термопар и датчика выводились через отдельные отверстия, уплотнить которые не удавалось, что не позволяло достичь необходимой глубины вакуума. В нашей лаборатории была полностью переработана конструкция передней крышки стенда. Все выводы теперь осуществляются через специальный герморазъем 1, что уменьшило количество отверстий и снизило норму течи.

Стенд представляет собой цилиндр 2 с рубашкой охлаждения (рис.1). В центре в специальных держателях 3 фиксируется трубка 4 из нержавеющей стали с омическим нагревателем 5 внутри. На поверхности трубки 4 установлены градуируемые ГДТП 6 и термопары 7. Корпус 2 охлаждается за счет циркуляции воды в двойной стенке. Подвод и отвод воды осуществляется через патрубки 8 и 9. Вакуумирование полости стенда производится через патрубок 10 [4].

В результате градуировки мы получили зависимость вольт-ваттной чувствительности ГДТП от температуры отнесения t .

Опыты показали, что тепловые процессы в системе сильно зависят от глубины вакуума, в котором теплопередача происходит только за счет теплопроводности и излучения [5].

Глубины вакуума определяется критерием Кнудсена K_n , который зависит от средней длины свободного пробега молекул и от геометрических параметров установки [5]. Области глубокого вакуума в нашем случае соответствует абсолютное давление 10^{-4} мм.рт.ст, которое обеспечивается форвакуумным насосом и насосом высокого вакуума.

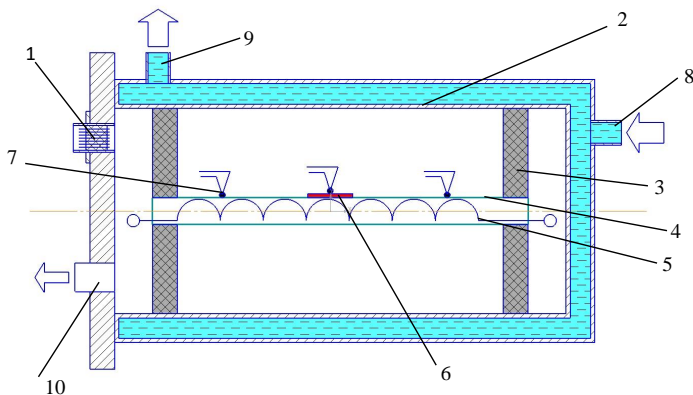


Рис.1. Схема градуировочного стенда

Контроль вакуума осуществляется с помощью манометрических ламп ПМТ-2 и ЛМ-2. Предел измерения разряжения лампы ПМТ-2 ограничен значением $1 \cdot 10^{-4}$ мм.рт.ст., поэтому в контур вставлена вторая лампа ЛМ-2, которая предназначена для измерения высокого вакуума.

Нагреватель питается от источника тока GPR-73060D. Выделяемая на нагревателе мощность контролируется вольтметром и амперметром. Измерение плотности теплового потока и температуры осуществляется при помощи прибора Fluke 289. В процессе градуировки на каждом режиме достигается стационар по температуре. Температурный режим регулировался напряжением на нагревателе.

Чувствительность ГГДТП S_0 определяется

$$S_0 = \frac{E}{q \cdot F}, \frac{\text{мВ}}{\text{Вт}},$$

где E измеренный сигнал, мВ; q – плотности теплового потока, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$; F площадь ГГДТП, м^2 .

Для расчета плотности теплового потока нам необходима мощность, выделяемая на нагревателе,

$$P = U \cdot I, \text{Вт},$$

где U – напряжение, В, I ток, А, в цепи нагревателя.

Плотность теплового потока, на поверхности трубки 4

$$q = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot l} = \frac{U \cdot I}{\pi \cdot d \cdot l}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2},$$

где $d = 13$ мм, $l = 220$ мм диаметр и длина трубки 4.

Таким образом, вольт-ваттная чувствительность датчиков, мВ/Вт:

$$S_0 = \frac{E \cdot \pi \cdot l \cdot d}{U \cdot I \cdot F}, \frac{\text{мВ}}{\text{Вт}},$$

Результаты градуировки ГГДТП медь+никель представлена на (рис.2). Чувствительность ГГДТП монотонно убывает с ростом температуры.

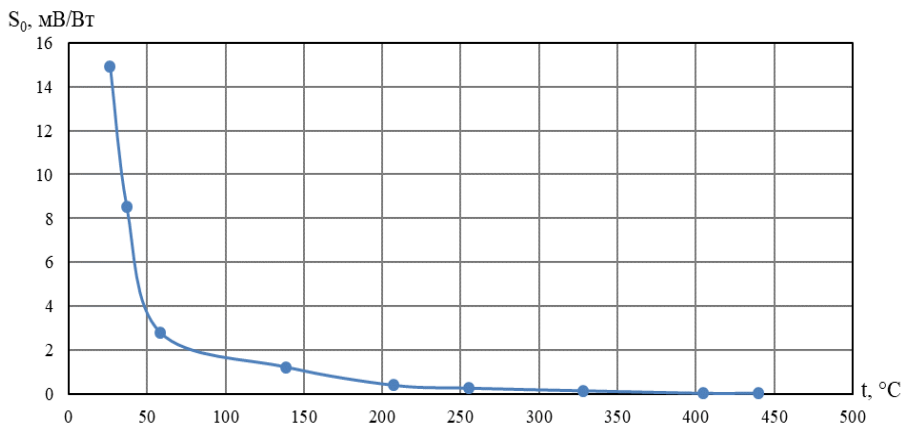


Рис. 2 – Зависимость чувствительности ГГДТП от температуры

Стенд позволяет выполнять градуировку ДТП в температурном диапазоне 25...800°C, наиболее актуальном в современной энергетике.

Оценка неопределенности градуировки производится путем расчета суммарной стандартной неопределенности ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98-1:2009 «Неопределённость измерения» [6].

В наших опытах относительная расширенная неопределенность градуировки составила 3,8%.

Работы по совершенствованию стенда продолжают, необходимо получить воспроизводимость результатов и сертифицировать датчики для применения в промышленности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сапожников С.З., Митяков В.Ю., Митяков А.В. Основы градиентной теплотометрии – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 203 с.
2. Кивляк П.Я., Митяков А.В. Градуировка высокотемпературных датчиков теплового потока. ХLI Неделя науки СПбГПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. Ч. III. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 166 с.
3. Кивляк П.Я., Митяков В.Ю. Стенд для градуировки высокотемпературных датчиков теплового потока. Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках: Тезисы докладов XIX Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством акад. А.И. Леонтьева. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 446с.
4. Ю. Д. Плотников. Манометрические преобразователи: Метод. указ. к л.р. по дисциплине «Вакуумная техника»/Моск. гос. ин-т эл-ки и мат-ки (технич. универ-т) - М., 2004 г., 16 с.
5. Розанов Л.Н. Вакуумное технологическое оборудование: учеб. Пособие – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 435 с.
6. Неопределённость измерения. ГОСТ 34100.1-2017/ISO/IEC Guide 98- 1:2009.

ASSESSMENT OF TEMPERATURE DISTRIBUTIONS FOR MICROCELL UO_2 PELLETS
AND HIGH-DENSITY COMPOSITE PELLETS ACCIDENT TOLERANT FUEL

Introduction. One of the fundamental elements of the generation of energy from nuclear fission is nuclear fuel. The analysis of cumulated experiences after the severe core melt accidents (such as Chernobyl and Fukushima Daiichi nuclear disasters) led to the revision of several nuclear safety standards, especially those relating to serious design and beyond-design accidents. Accident Tolerant Fuel development is one of the milestones of the next-generation nuclear industry.

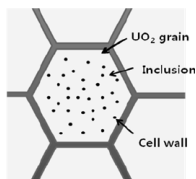
Main aims. The goal of this study is to calculate the power distribution of current Russian PWR designs (VVER), to compare different compositions of fuel materials according to their heat conductivity and power distributions. The main objective of this study is to see whether the temperature of cladding ensures the safety margins in terms of the zirconium oxidation reaction.

Reference parameters [1] have been chosen from the current commercial nuclear power plants, in this case, VVER-1200. These types of reactors use light water as coolant and moderator in a vessel which is pressurized to avoid boiling in the reactor core. Table 1 summarizes some specifications for calculating.

Table 1. Specifications of reactor units VVER-1200 [1]

Key specifications	Values
Thermal capacity, MW	3212
Nominal pressure at the core exit, MPa	16,2
Coolant temperature at the core exit, °C	329,7
Coolant temperature at the core entrance, °C	298,6
Coolant rate, m^3/h	86000
Outer diameter of a fuel rod, mm	9,1
Thickness of cladding, mm	0,685
Outer diameter of a fuel pellet, mm	7,6
Height of fuel rods, m	3,68

In this study we examined two different scenarios by using the ANSYS program package. During the analysis, thermal conductivities of six different fuel compositions, which are already known, were taken into calculations. These six different fuel compositions [2], which differ from each other by their Mo content and fuel structures (Fig. 1), are used either in the currently operating nuclear power plants or studied for experimental purposes. Heat conductivity values were taken from corresponding sources [2 – 4].

Fig. 1. Conceptual schematic of micro-cell UO_2 pellet [3]

To study power distribution, Nusselt numbers were calculated with data taken from the corresponding tables. Heat transfer coefficients determined by using Nusselt numbers are essential for the future analysis to understand power distributions that occur during different working scenarios. We calculated two different power distributions for two different scenarios by considering fuel dimensions. These power distributions were used as heat generation data for the ANSYS program package. We applied ANSYS [5] to analyze modelings of fuel pellets, Helium gas between fuel and cladding, and cladding around the fuel (Zr + Nb %1). Thermal analysis executed by ANSYS program package at the center of the fuel or the cladding around it to study temperatures is presented in the form of graphics. The change of temperature from the center to the cladding of two different power distributions is given in Figure 2 and Figure 3.

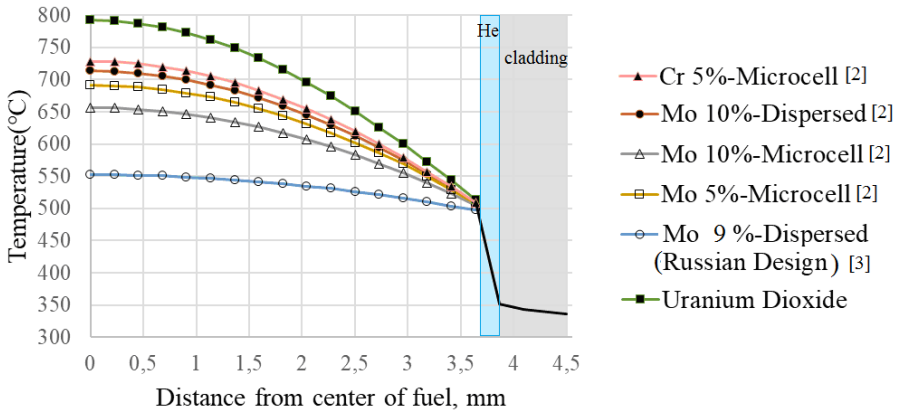


Fig. 2. Thermal behaviors of composite pellets during nominal working regimes(167 W/cm)

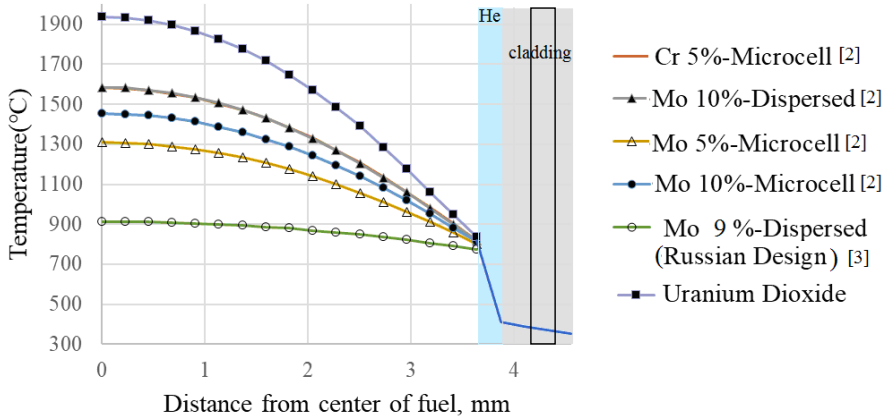


Fig. 3. Thermal behaviors of composite pellets during excessive working regimes(420 W/cm)

Results:

1. In fuel compositions, molybdenum-containing structures were observed to better tolerate power distribution.
2. The fuel compositions in the microcell structure tolerated the power distribution better than those in the dispersed structure.
3. All fuel compositions did not reach the melting point as no fuel core and no fuel barrier exceeded the melting point. This is an important control mechanism for the safety of the nuclear power plant. In Figure 2, it is clear that the working temperature of the fuel did not reach 1500°C and the temperature of the cladding surface 350°C, respectively. In Figure 3, it is shown that the Russian design Mo fuel composition and the 5 % Mo, 10% microcell fuel compositions did not reach 1500°C (melting temperature for cermet fuel [3], for uranium dioxide 2800°C). Because of that, these fuel compositions can be suitable for VVER; but there are also some other aspects to examine (swelling of the fuel is not studied)

REFERENCES:

1. Rosatom.ru. (2019). Rosatom State Atomic Energy Corporation ROSATOM global leader in nuclear technologies nuclear energy. [online] Available at: <https://www.rosatom.ru/en/rosatom-group/engineering-and-construction/modern-reactors-of-russian-design/> [Accessed 10 Oct. 2019].
2. International Atomic Energy Agency, Accident Tolerant Fuel Concepts for Light Water Reactors, IAEA-TECDOC-1797, IAEA, Vienna. 2016.
3. Yang J-H. Thermo-physical properties of micro-cell UO₂ pellets and high density composite pellets for accident tolerant fuel / J-H. Yang, D-J. Kim, K. S. Kim, Y-H. Koo // TopFuel 2013, Charlotte, North Carolina, September 15-19, 2013.
4. Savchenko A. Accident advanced tolerant cold composite fuel. Materials, technology and peculiarities of fuel cycle / A. Savchenko, V. Ivanov, V. Novikov, A. Vatulin // Proceedings of IAEA TM on accident tolerant fuel concepts for light water reactors. 13 – 17 October 2014. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.
5. ANSYS Academic engineering simulation software <https://www.ansys.com/academic>

УДК 621.039.524:536.24

B. Peksen, S. Ucar, E. Beki, A.P. Paramonov
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

NUMERICAL ANALYSIS OF FUEL RODS UNDER REACTIVITY INITIATED ACCIDENT

Introduction. The main objective of this study is the unexpected ejection of control rods from the core of the nuclear reactor as a result of the mechanical failures during an accident situation, generally known as a reactivity-initiated accident (RIA). The primary concern of this accident scenario is the rapid increase of positive reactivity and local increment of energy release at the ejections locations. Given phenomena is modeled for the full capacity operating of the reactor. Possible deviations of all initial data are not taken into account. For the calculations in our work we assume conditions of newly inserted fuel rods. By the term "ejection" we mean, rapid (about 0.1 s) displacement of control rods group from the core of the reactor. As a result of it, for a very short interval of time, reactivity insertion caused by the growth of neutron flux and redistribution of energy release through the volume of the reactor core. Maximum redistributions of energy occur at the rod ejections locations. Ejection leads to a sharp increase in energy, the power growth is limited by the negative feedback (according to the fuel temperature) and reactivity insertion is compensated [1, 2].

Main aims. We apply ANSYS program package to compare two different types of fuel composition in terms of their melting point and check if these parameters ensure security margins

against reactivity insertion accident [3]. We model temperature distribution at the ANSYS and cross check temperature parameters at the center of the fuel and the cladding around it. Temperature at the center of the fuel rod and the cladding did not reach the melting point of the fuel compositions and the cladding materials.

Data for energy releases used in the calculations of this study is taken from previous experiments executed by different researchers [2, 4 – 6]. During the fuel pellet modeling, fuel dimensions are designed based on modern designs dimensions (Table 1). Zirconium oxidation reaction and heat exchange crises that would occur in the accident did not considered in this work. Volumetric heat generation is calculated by the following formula:

$$q_v^{peak} = \frac{Q_{peak}}{\pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot H}$$

where q_v^{peak} is the volumetric heat generation, Q_{peak} is the maximum power generation during ejection of the control rod [2], d is the outer diameter of the fuel pellet, H is the height of the fuel rod.

Table 1. Fuel and cladding temperatures during the control rod ejection [1]

Power Distribution	Fuel Temperature(°C)		Cladding Temperature(°C)	
	Uranium Dioxide	Russian Design Fuel U-9%Mo [5]	Uranium Dioxide	Russian Design Fuel
167 W/cm	792	552	329	
420 W/cm	1936	913	351	
220 kW/rod [2]	2785	1188	369	

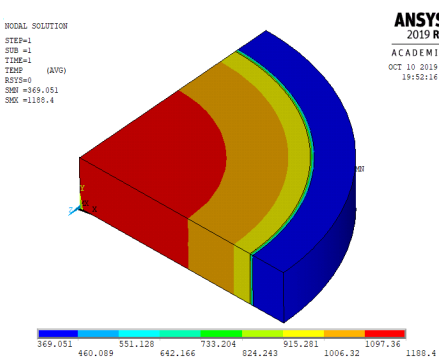


Fig. 1. Thermal analysis of U – 9% Mo Dispersed Russian Design

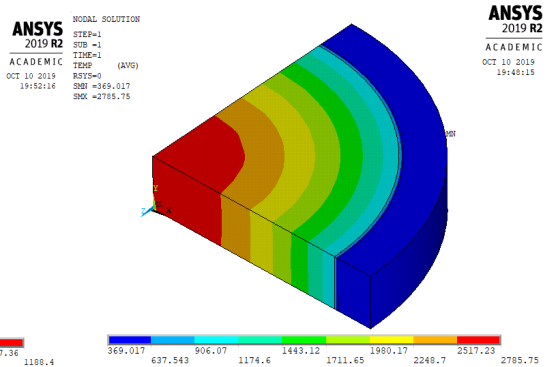


Fig. 2. Thermal analysis of uranium dioxide

With the help of Mechanical ANSYS Parametric Design Language, similar to the fuel structure of Russian design PWR reactors (VVER-1200); modelled three layers. These three layers created to analyse fuel, cladding and inert gas (in this case Helium) between them.

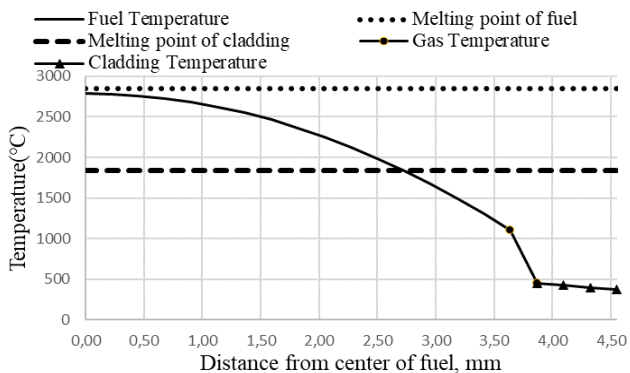


Fig. 3. Thermal behaviour of UO_2 fuel and cladding under RIA conditions

Three different thermal loads used for calculations of three different situations. These are average (167 W/cm), maximum (420 W/cm) and peak (220 kW/rod) loads. Under these conditions two different kinds of fuel compositions examined. These are traditional uranium oxide fuel and accident tolerant fuel (ATF), which is the composition of Uranium and 9% Molybdenum. The results are given in Figure 1-3.

Results:

1. The temperature at the center of the fuel pellet and the cladding did not reach the melting point (2800 °C and 1837 °C, respectively) of these materials during the proposed reactivity insertion accident based on rod ejection.
2. The safety factor of the Russian designed fuel composition (U-9%Mo dispersed fuel) is higher than of the other proposed fuel compositions.
3. Insertion of reactivity, taking place during the fuel rod ejections, did not affect fuel cladding negatively, its integrity was preserved.

REFERENCES:

1. OECD Nuclear Energy Agency State-of-the-art Report, «Nuclear Fuel Behaviour under RIA Conditions». 2010 [OECD, 2010].
2. Синегрибова А.И. Анализ области применения распределенной нейтронно-физической модели ТВС в ПК КОРСАР/ГП / А.И. Синегрибова, М.А. Увакин // Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок. – Изд-во: Федеральное государственное унитарное предприятие «Научно-исследовательский институт имени А.П. Александрова» (Сосновый Бор). 2018. № 3(13). С.9-18.
3. ANSYS Academic engineering simulation software <https://www.ansys.com/academic>
4. Korostin O.S. Experimental Investigations of the Properties of Zr-1% Nb Alloy / O.S. Korostin , A.V. Nikulina, V.E. Peletsky, I.I. Petrova, N.N. Popov, V.N. Samsonov // Teplofizika Vysokikh Temperatur. 1998. Vol. 36. No. 2. PP. 223–226 (Russian).
5. Savchenko A. Accident advanced tolerant cold composite fuel. Materials, technology and peculiarities of fuel cycle / A. Savchenko, V. Ivanov, V. Novikov, A. Vatulin // Proceedings of IAEA TM on accident tolerant fuel concepts for light water reactors. 13 – 17 October 2014. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA.
6. Carbajo J. A review of the thermophysical properties of MOX and UO2 fuels / J. Carbajo, G. Yoder, S. Popov, V. Ivanov // Journal of Nuclear Materials. 2001. P. 181-198.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ ПРОДУКТОВ
СГОРАНИЯ ВОДОМАЗУТНЫХ ЭМУЛЬСИЙ

Введение. Водомазутная эмульсия (ВМЭ) – синтетическое жидкое топливо, являющееся дисперсной системой из двух нерастворимых друг в друге жидкостей – воды и мазута. Физико-химические свойства мазута и ВМЭ отличаются, у каждого из данных видов топлив свои особенности горения, теплообмена.

Актуальность. Сжигание мазута приводит к образованию летучей золы, диоксида серы, оксидам азота, газообразным продуктам неполного сгорания, выбросу в атмосферу соединений ванадия, солей натрия и частиц сажи. При сжигании ВМЭ процессы горения в топке котлов ускоряются, снижаются токсичные выбросы. Поэтому в современной энергетике приобрели широкое распространение водомазутные эмульсии.

Цель и задачи работы. Цель данной работы – исследование возможности снижения выбросов оксидов серы, оксидов азота и других вредных веществ в атмосферу за счёт использования водомазутных эмульсий. Задачами работы являются:

- анализ влияния продуктов сгорания ВМЭ на атмосферу на основании графических зависимостей, представленных в работе;
- исследование влияния сжигания ВМЭ на оборудование.

В настоящее время существует много методов получения энергетически чистого мазута [1 – 3]. Использование такого топлива позволяет уменьшить количество вредных выбросов в атмосферу. Однако, большинство из способов не оправданы из-за экономической нецелесообразности. К ним относятся:

- пиролиз (высокотемпературный), осуществляющийся при контакте расплющенного мазута с теплоносителем (кварцит, нефтяной кокс или водяной пар);
- глубокое обессеривание мазута (позволяет снизить [4] содержание серы с 2,5% до 0,5%).

Подготовку ВМЭ можно осуществить разными технологиями: ультразвуковой, гидродинамической, виброкавитационной, механической. Смешение мазута с водой происходит в устройстве, обычно устанавливаемом перед форсунками топочной камеры. В качестве таких устройств могут использоваться коллоидные мельницы различных конструкций, диспергаторы, кавитаторы, гомогенизаторы, роторно-пульсационные аппараты, пропеллерные, ультразвуковые, турбинные и другие смесители, пароакустическая головка-эмульгатор «Факел М».

В эмульгаторе, находящемся перед форсункой, происходит смешение мазута с водой. В результате добавления воды в мазут при создании ВМЭ происходит вторичное диспергирование в камере сгорания, что приводит к увеличению поверхности горения топлива, а, следовательно, и увеличению скорости процесса горения. Первичное диспергирование осуществляется форсуночным устройством камеры сгорания, диаметр капли образовавшейся эмульсии составляет от 0,05 мм и менее. Капля нагревается в течение 1,5 с при температуре 1200 °С, и вследствие чего за счет невысокой температуры кипения (испарения) воды, данная капля как бы разрывается, разрывая на себе несущую пленку мазута на более мелкие капли, которые сгорают за время равное 0,04 с. Мазут же без ввода в него воды, сгорает равномерно без взрыва, в течение 5-6 с.

Таким образом, увеличивается не только скорость сгорания, но и увеличится КПД парогенератора. Более того, часть капель эмульсии долетает до поверхностей нагрева и, взрываясь на них, способствует как предотвращению, так и очистке сажистых отложений.

Количество теплоты, затрачиваемое на подогрев воды, которая вводится в мазут, рассчитывается по формуле (1):

$$q_{1-2} = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT. \quad (1)$$

На основании расчетов по формуле (1) была получена следующая зависимость (рисунок 1):



Рис. 1. Зависимость количества теплоты на подогрев воды от процентного содержания воды в ВМЭ

Также на основании расчетов количества теплоты, выделяющейся при использовании эмульгированного топлива, и количества теплоты, получаемой при сгорании неэмульгированного топлива равно 9370 ккал/кг для мазута, построена следующая зависимость (рисунок 2):

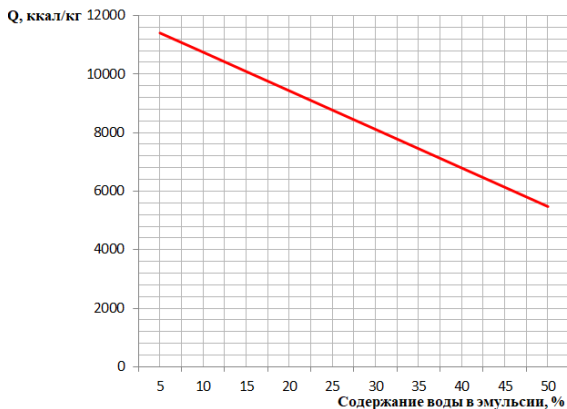


Рис. 2. Зависимость количества теплоты, выделяющейся при использовании ВМЭ, от процентного содержания воды в ВМЭ

На основании расчетов, приведенных в [1], был построен график (рисунок 3). Зависимость на рисунке 3 показывает, во сколько раз уменьшается объём выбросов азота, углекислого газа, оксидов серы при использовании ВМЭ при изменении процентного содержания воды в ней.

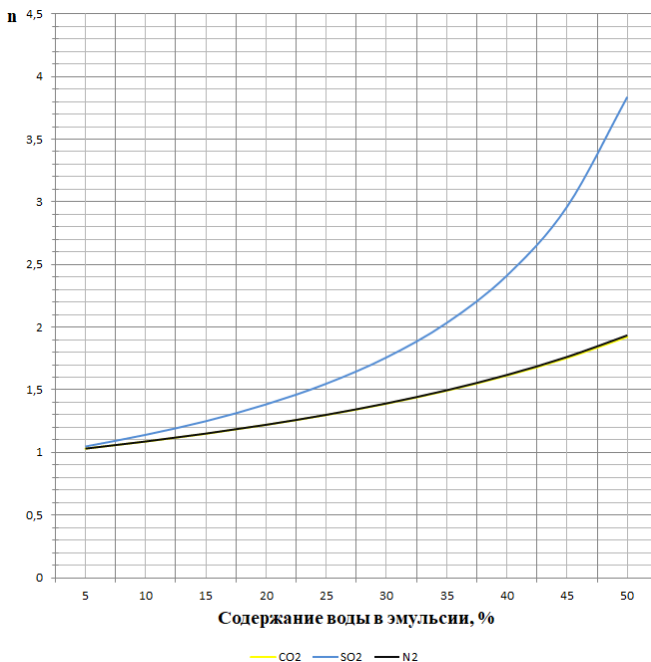


Рис. 3. Уменьшение объёма выбросов в n раз в зависимости от процентного содержания воды в ВМЭ

Итоги работы:

- 1) Использование ВМЭ приводит к снижению объёма вредных выбросов, в частности выбросов оксида серы почти в 4 раза.
- 2) Эмульгированное топливо сгорает значительно быстрее безводного, и за счёт увеличения поверхности нагрева скорость горения увеличивается, следовательно, растёт КПД котла.
- 3) Взрыв капель уменьшает количество отложений на тракте котла, следовательно, повышается надёжность работы котельного оборудования.
- 4) Эмульгирование подразумевает исключение из технологии топливоподготовки операции отстаивания, слива подтоварной воды, что свидетельствует об уменьшении энергозатрат на собственные нужды.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Зверева Э.Р. Ресурсо-, энергосберегающие технологии в мазутных хозяйствах тепловых электрических станций. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2010. – 184 с.
2. Иванов В.М. Топливные эмульсии, М.: Изд-во АН СССР, 1962 – 216 с.
3. Зверева Э.Р., Фарахов Т.М. Энергоресурсосберегающие технологии и аппараты ТЭС при работе на мазутах. М.: «Теплотехник», 2012. – 184 с.
4. Назмеев Ю.Г. Мазутные хозяйства ТЭС. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 612с.

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ПУТЕМ УТИЛИЗАЦИИ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ НА ТЭЦ Г. САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Введение. Согласно «Стратегии экологической безопасности РФ на период до 2025 года», на территории нашей страны накоплено свыше 30 миллиардов тонн отходов. В результате деятельности населения, организаций и предприятий Санкт-Петербурга на его территории образуется 1,7 миллионов тонн твердых бытовых отходов (ТБО). Основная часть ТБО размещается на полигонах без переработки.

Цель работы – Показать возможность участия электрогенерирующих компаний в формировании новой системы обращения с отходами с вовлечением вторичных компонентов отходов в хозяйственный оборот для получения тепловой и электрической энергии на ТЭЦ города Санкт-Петербурга.

Согласно «Территориальной схеме обращения с отходами Санкт-Петербурга» центры по переработке ТБО возможно разместить в северной и южной части города по половине объема от всех образующихся ТБО каждый. Одним из наиболее перспективных методов термической утилизации является газификация ТБО с получением в процессе газификации синтез-газа и его дальнейшим использованием в качестве топлива в паросиловом цикле. Отсутствие прямого сжигания отходов исключает установку дорогостоящего газоочистного оборудования, повышает экологичность установки, а калорийность получаемого при этом синтез-газа постоянна. Данная технология получила широкое распространение в Европе, в частности в Финляндии (город Лахти) [1].

Минусом данной технологии является необходимость предварительной подготовки альтернативного топлива (АТ) из ТБО. В АТ используются фракции ТБО с относительно высокой теплотой сгорания: бумага, текстиль, древесина, пластмасса [2]. Производство включает в себя несколько стадий: сепарация, измельчение, сушка сырья и изготовление топливных брикетов. Средние значения теплоты сгорания АТ составляют от 12 до 18 МДж/кг. Принципиальная схема газификации ТБО на ТЭЦ в городе Лахти представлена на рисунке 1.

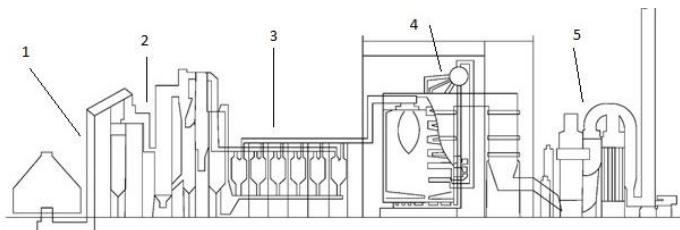


Рис. 1 Принципиальная схема газификации

1 - топливopодача, 2 – отделение газификатора, 3 – фильтры, 4 – паровой котел, 5 – газоочистка

Процесс получения синтез-газа из АТ происходит в газификаторе (2) с циркулирующим кипящим слоем, куда поступает топливо по линии топливopодачи (1) с узла подготовки топлива. После газификатора синтез-газ охлаждается в газоохладителе для предотвращения образования диоксидов и оксидов NOx. Во время этого процесса происходит отдача теплоты газа на подогрев питательной воды. Соответственно,

подогреватели высокого давления турбины могут быть заменены на водо-водяной теплообменник. Очищенный в газовых фильтрах (3) синтез-газ поступает в паровой энергетический котел (4) [3 – 5]. Возможная принципиальная схема нового энергоисточника на АТ приведена на рисунке 2.

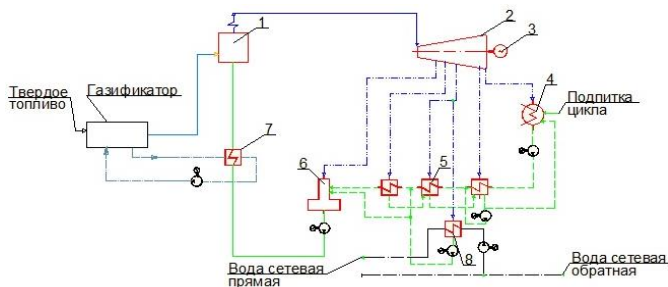


Рис. 2 Принципиальная тепловая схема

- 1 – паровой котел, работающий на синтез-газе, 2 – теплофикационная турбина, 3 – электрогенератор, 4 – конденсатор, 5 – подогреватели низкого давления (ПНД), 6 – деаэрация, 7 - водо-водяной охладитель синтез-газа, 8 – сетевой подогреватель

Новый источник на АТ целесообразно размещать в районе действующих электростанций для минимизации затрат на создание внешней инфраструктуры. Площадка действующей ТЭЦ для размещения нового энергоисточника должна быть расположена в районе с удовлетворительной транспортной и логистической доступностью, удаленно от жилых и селитебных территорий, иметь свободные площадки для размещения нового источника генерации, а также удовлетворять требованиям по соблюдению санитарно-защитной зоны. На ТЭЦ должна быть предусмотрена возможность отпуска тепловой энергии от нового источника через существующую схему выдачи тепловой мощности ТЭЦ. При интеграции в теплофикационную схему действующей станции, новая ТЭЦ должна получить приоритет в отпуске тепловой энергии. Минимальная нагрузка ГВС потребителей действующей электростанции должна полностью обеспечить новую ТЭЦ круглогодичной тепловой нагрузкой в размере 100% от её расчётной тепловой мощности. Включение нового энергоблока в работу также не должно создавать трудностей для функционирования действующей ТЭЦ в части выдачи электрической энергии в энергосистему.

В целях исследования теплота сгорания АТ принята 12 МДж/кг. Исходя из морфологического состава ТБО для г. Санкт-Петербург [6 – 7] процент извлечения АТ из ТБО, поступающих на сортировку, составил 30%. Приняв для расчетов объем образовавшихся ТБО за 2015 год, при доле в 30% годовой выход АТ составит 253769,6 т/год в южной и 257236,3 т/год в северной части города. Для работы нового источника энергии возможно применение стандартных сопряженных параметров пара на выходе с котла в Российской Федерации, а именно давление 9,8 МПа, температура 525°С и давление 13,8 МПа, температура 540°С. Исходя из годового объема АТ, получаемого из мусора южной части города, средней продолжительности ремонта оборудования ТЭЦ на АТ (22 дня), средних КПД газификатора (87,5%) и парового котла (93%), а также теплотворной способности АТ можно рассчитать расход топлива, поступающего в газификатор, и паропроизводительность котла, которые составят $G_{AT}=31,25$ т/ч и $G_p=120$ т/ч соответственно.

Результаты. Электрическая мощность, генерируемая в паротурбинной установке с начальным давлением 13,8 МПа, составила 28,43МВт, в установке с начальным давлением

9,8 МПа – 27,29 МВт. Тепловая мощность сетевой установки одинакова. Основные технические показатели, полученные на основании расчетных моделей, сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Основные технические показатели расчетных моделей

Показатель, ед. измерения	Обозначение	p=13,8 МПа t=540°C	p=9,8 МПа t=525°C
Выработка электроэнергии, МВт-ч	$N_{э, \text{выр}}$	238045,92	228664,80
Отпуск тепла потребителям, Гкал	$Q_{\text{тэл}}$	445087,53	445087,53
Суммарные затраты электроэнергии на собственные нужды, МВт-ч	$N_{э, \text{сн}}$	49660,20	47703,15
Отпуск электроэнергии, МВт-ч	$N_{э, \text{отп}}$	188385,72	180961,65
Суммарные затраты условного топлива, т.у.т.	$V_{\text{топ}}$	107091,71	107091,71
Расход условного топлива на отпуск электроэнергии, т.у.т.	$V_{э}$	38103,1	38103,1
Расход условного топлива на отпуск тепла, т.у.т.	$V_{\text{тэ}}$	68988,6	68988,6
Удельный расход топлива на отпуск энергии, г/кВтч	$b_{э, \text{и}}$	202,3	210,6
Удельный расход топлива на отпуск тепла, кг/Гкал:	$b_{\text{тэ, и}}$	155,0	155,0
КИТТ брутто	$\eta_{\text{китт}}$	0,81	0,80

Выводы. При работе станции в теплофикационном режиме оба варианта имеют схожие показатели энергетической эффективности и могут считаться равноценными ввиду незначительной разницы между ними. Таким образом, каждый из них является приемлемым и окончательный выбор основного и вспомогательного оборудования должен производиться исходя из стоимости этого оборудования.

При рыночной стоимости одного кВтч и цене КОМ за один МВт установленной мощности более высокие параметры пара эффективно применять на горизонте в 15 лет при разнице в цене оборудования в 139,54 млн. рублей или примерно 75\$/кВт установленной мощности (без учета нормы дисконтирования).

Основным требованиям к площадке действующей ТЭЦ, на которой планируется расположение нового энергоисточника, по г. Санкт-Петербург соответствуют Северная ТЭЦ-21 и Южная ТЭЦ-22 ПАО «ГПК-1».

ЛИТЕРАТУРА:

1. Официальный сайт компании Valmet [Электронный ресурс]. URL: <https://www.valmet.com/>
2. И.М. Бернадинер, Е.Ю. Александрова. Использование отходов как альтернативного топлива в цементной печи // Твердые бытовые отходы. 2017. № 11. С. 22-25
3. Е.Л. Шабуров, А.В. Федюхин, В.А. Ипполитов. Расчет режимных параметров установки газификации ТБО // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. №3. С. 38-44
4. Я.А. Владимиров, Л.В. Зысин. Методические вопросы энергетического использования твердых коммунальных бытовых отходов и продуктов их газификации // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т.24. №1 С.5-16
5. Lennart Ljungblom. Biomass to energy XL // Bioenergy International. 2013. № 63
6. В.П. Ложечко, М.С. Крицын. О методах получения альтернативного топлива из твердых бытовых отходов // Современное машиностроение. Наука и образование. 2013. № 3. С. 982-991.
7. И.В. Ламзина, А.В. Голдов, Я.И. Князев, И. А. Полозова, В.Ф. Желтобрюхов. Получение и использование альтернативного топлива из твердых бытовых отходов для цементной промышленности // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. С.18

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОИЗОЛИРУЮЩИХ ФЛАНЦЕВ НА КОРРОЗИЮ ТЕПЛОПРОВОДОВ

Введение. Проблема защиты теплопроводов от коррозии крайне актуальна. Коррозия обусловлена высокой температурой эксплуатации труб, которая интенсифицирует все процессы коррозионного разрушения. Даже использование различных высокоэффективных антикоррозионных покрытий не позволяет полностью защитить теплоотрассы от коррозии. Обследованием теплопроводов, проведенным объединением ВНИПИ Энергопром, установлено, что применение передовой зарубежной конструкции теплопроводов с пенополиуретановой изоляцией и оболочкой из толстостенного полиэтилена (труба в трубе) при бесканальной прокладке число зарегистрированных повреждений на 9-й год эксплуатации достигает 150 на 100 км.

Одним из средств защиты подземных металлических трубопроводов от почвенной коррозии и коррозии, вызываемой блуждающими токами, являются электроизолирующие фланцы. Они уменьшают электрохимическую коррозию трубопровода путем увеличения его продольного сопротивления и соответствующего снижения величины разрушающего тока. Исследования показали [1], что арматура в бетоне в общем случае имеет потенциал на 0,3-0,4 В более положительный, чем сталь в грунте. Вследствие этой разности потенциалов при проходе теплопроводов через железобетонные конструкции (фундаменты жилых зданий, стены тепловых камер, колодцев с задвижками и т.п.), при котором возможен контакт трубы с металлической арматурой, и при наличии дефектов в изолированных трубах возникает опасность коррозии из-за образования гальванического элемента, замкнутого через обладающую малым сопротивлением металлическую поверхность трубы (рис. 1). Растворяющимся анодом в этом случае служат участки поверхности труб с поврежденной изоляцией, контактирующие с грунтовым электролитом. Коррозионное разрушение будет наиболее сильным при небольших площадях дефектов.

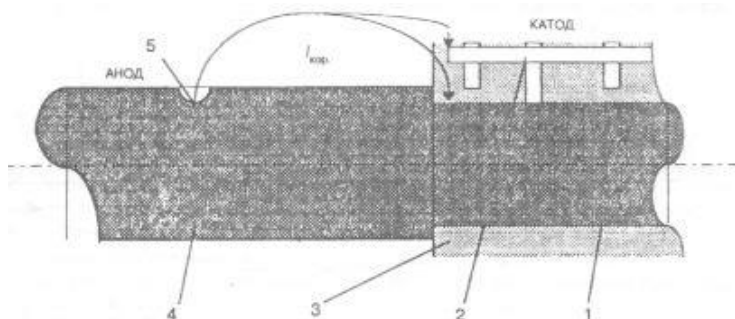


Рис. 1. Коррозия труб, проходящих через железобетонные фундаменты: 1 – металлическая труба, 2 – железная арматура, 3 – бетонный фундамент, 4 – изоляционное покрытие, 5 – дефект в изоляции трубопровода

Скорость анодного растворения определяется правилом площадей [1, 2]:

$$J_a = \frac{\Delta U}{r_k} \frac{A_k}{A_a}, \quad (1)$$

где J_a – плотность анодного тока; ΔU – разность стационарных потенциалов; r_k – удельное сопротивление поляризации катодной области; A_k и A_a – площади катодной и анодной областей коррозионного элемента.

Используя закон Фарадея, можно увязать скорость анодного растворения с соотношением площадей гальванического элемента:

$$W = \frac{M}{zF} J_a = \frac{M}{zF} \frac{\Delta U}{r_k} \frac{A_k}{A_a}, \quad (2)$$

где M – атомная масса металла; z – заряд образующегося катиона; $F = 96500$ Кл/моль – число Фарадея.

Для стальной трубы при $\Delta U = 0,3$ В и $r_k = 10$ Ом·м² [1] соотношение (2) можно представить в виде:

$$W = 0,0313 \frac{A_k}{A_a}, \text{ г/(м}^2\cdot\text{ч)}, \quad (3)$$

которое графически имеет вид, показанный на рисунке 2.

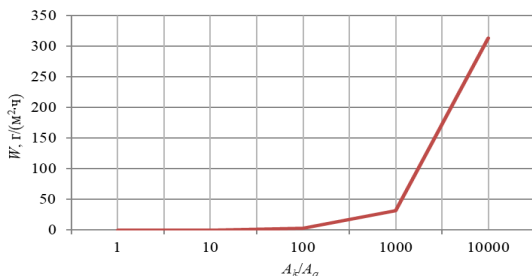


Рис. 2. Скорость коррозии железной трубы W в коррозионном элементе как функция отношения площадей гальванического элемента

Известны случаи [1], когда в течение одного-двух лет стальные трубопроводы для газа и воды вблизи крупных железобетонных конструкций оказывались разъеденными. Поэтому немецкие нормы TRGI предусматривают в домах-новостройках изолирующие вставки в трубопроводах, проводимых к этим домам.

Согласно [3], электроизолирующие фланцевые соединения (ЭФС) используют для защиты тепловых сетей от коррозии. Как правило, они представляют собой прочные соединения с электроизолирующими прокладками и крепежными деталями, не имеющими электрического контакта с корпусом фланца. ЭФС для тепловых сетей, кроме того, имеют еще диэлектрическое покрытие на внутренней поверхности труб, примыкающих к фланцевому соединению.

Обсуждение результатов и выводы. В работе на базе модельных представлений для процесса коррозии теплопровода на вводе в здание рассчитана относительная скорость электрохимической коррозии при контакте трубы с железобетонными конструкциями.

В процессе рассмотрения задачи сделан вывод необходимости наличия электроизолирующих фланцев на вводах всех зданий, что должно резко уменьшить коррозионное разрушение тепловых сетей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Von Baeckmann W. Taschenbuch für den katholischen Korrosionsschutz. Essen: Vulkan-Verl., 1992. – 337 s.
2. Baeckmann W. Handbuch des katholischen Korrosionsschutzes / W. von Baeckmann und W. Schwenk // Verlag Chemie. – 1980. – S. 465.
3. РД 154–34.0–20.518 – 2003 Типовая инструкция по защите трубопроводов тепловых сетей от наружной коррозии. - Издательство «Новости теплоснабжения». Москва. 2003. 114 с.

УДК 621.311.25

Н.А. Селезнев^{1,2}, М.В. Конюшин¹, Е.А. Шепенева²

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
² АО «АТОМПРОЕКТ»

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СПЕЦИАЛИСТОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ТРЕБОВАНИЙ ПО ЭВАКУАЦИИ ПЕРСОНАЛА АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Актуальность работы. С 2019 года Госкорпорация по атомной энергии «Росатом» строит и планирует ввести в эксплуатацию в России 4 новых энергоблока и более 30 блоков за рубежом. Одним из приоритетных контрактов является сооружение атомной электростанции «Ханхикиви-1» (АЭС «Ханхикиви-1») в Финляндии: генеральный подрядчик - RAOS Project Oy, генеральный проектировщик – Санкт-Петербургский Проектный Институт АО «АТОМПРОЕКТ». Успешное прохождение всех этапов лицензирования, энергетический пуск блока, как финала проекта, будет означать, что АЭС с ВВЭР-1200 по усовершенствованному российскому проекту (референтный проект – Ленинградская АЭС-2, проект АЭС-2006) полностью соответствует требованиям как финского регулирующего органа Radiation and Nuclear Safety Authority (STUK), который признают одним из самых требовательных в мире, так и сложного контракта.

Следует отметить, что ввиду повышенных требований владельца АЭС к безопасности, а также различия в финских и российских нормах и правилах, стандартизирующих документах, уже на данный момент проект АЭС «Ханхикиви-1» значительно отличается от взятого за основу первого энергоблока Ленинградской АЭС-2. Изменения вносятся как в принципиальные схемы систем (с добавлением оборудования, изменением классов безопасности и категорий сейсмостойкости), так и в компоновочные решения зданий и сооружений, что ведет к изменению габаритов зданий, смещению их на генеральном плане, даже к появлению принципиально новых.

Цели и задачи исследования. Одной из серьезных проблем в 2019 году стало выполнение требований постановления правительства Финляндии 848/2017 Decree of the Ministry of the Environment on Fire safety of Buildings [1] о пожарной безопасности, в частности раздела о рассмотрении путей эвакуации при пожаре и разделении зданий и сооружений на пожарные отсеки. Требования постановления по длине пожарных отсеков (как для тех, где есть автоматическое пожаротушение, так и для прочих), возможностях эвакуации в другие здания разнятся с используемыми в России стандартами [2, 3]. Это приводит к тому, что в ряде случаев требования не выполняются.

Дополнительные сложности в решении данной проблемы создаёт практически завершенная 3D-модель энергоблока в составе информационной модели станции: любые изменения, внесенные в архитектурную часть, влияют на готовые решения по размещению электрических кабелей, воздуховодов вентиляции и технологического оборудования и трубопроводов, которые в свою очередь также отвечают соответственным требованиям, и их перемещение, которое не всегда возможно, должно быть обосновано.

Решением данной проблемы является разработка методики взаимодействия специалистов, занятых в проектировании энергоблока. Суть методики состоит в том, что только при тесном взаимодействии функциональной группы ответственных специалистов и их концентрации на, например, одном здании становится возможным найти приемлемое решение вопроса эвакуации (поскольку все требования постановления в итоге предназначены для обеспечения безопасных путей выхода персонала из помещений при пожаре).

Описание разработанной методики. Для выполнения взаимодействия специалистов должна быть сформирована рабочая группа в составе архитектора, строителя, специалиста по компоновке технологических трубопроводов, трубопроводов систем водоснабжения, канализации, пожаротушения, оборудования вентиляции и отопления и трассировки электрических кабелей. Руководителем и координатором работы группы назначается инженер-проектировщик, ответственный за здание в целом. Распределение обязанностей членов группы и методика работы представлен ниже и на рис. 1. В качестве исходных данных принимались ранее утвержденные чертежи и планы.

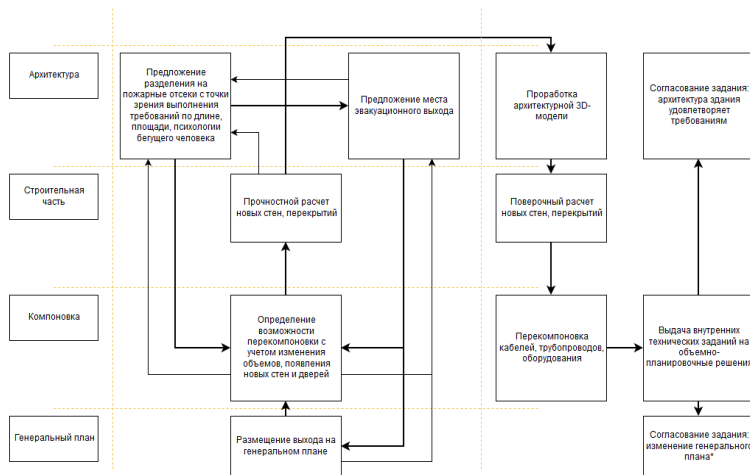


Рис. 1. Методика взаимодействия специалистов в составе группы

Архитектор, отвечая за объемы помещений, фактически становится ответственным за выполнение самого постановления [1]. В результате перед архитектором ставится задача: разбиение помещения на отсеки, не превышающие разрешенную длину и площадь, а также предложение путей выхода из здания, оптимальных с точки зрения только путей эвакуации.

Специалисты по компоновке согласуют перемещение стен с учетом размещения самокомпенсационных участков горячих трубопроводов или выполнения требований по необходимым расстояниям для установки дверей между отсеками, выполняют разделение на

новые помещения с точки зрения обеспечения вентилирования. Немаловажной является задача сохранения интерфейсов с соседними зданиями. Отдел генерального плана определяет места, где можно разместить новые выходы. Строитель анализирует предложенные изменения на предмет прочности стен и перекрытий, возможность армирования в местах проемов, дверей, проходов.

Апробация методики. Разработанная методика была апробирована в рамках совещаний в офисе АО «АТОМПРОЕКТ» в г. Хельсинки, Финляндия с 30 сентября по 4 октября 2019 г. Рассматриваемый объект – кабельно-трубопроводный тоннель, расположенный у здания безопасности под эстакадой транспортного шлюза. В таблице 1 представлены основные запланированные перед началом работ этапы, их статус и сроки выполнения на момент завершения деятельности группы.

Выводы. В результате работы были достигнуты намеченные цели, а именно согласованы объемно-планировочные решения здания, удовлетворяющие постановлению [1], а также позволяющие перекомпоновать все системы без нарушения других требований, предъявляемых к проекту. Положительный результат говорит об эффективности данного метода работы и необходимости внедрения его в систему проектирования.

Таблица 1. Планирование и выполнение основных этапов работ.

Этап	Ответственные исполнители	Запланированный срок	Фактический срок
Предложение новой архитектуры	Архитектура	30.09 – 01.10	30.09 – 02.10
Проработка и корректировка архитектуры	Все	01.10 – 02.10	01.10 – 02.10
Актуализация 3D-модели	Архитектура, компоновка	01.10 – 03.10	02.10 – 04.10
Оформление, выдача, согласование заданий	Все	03.10 - 04.10	04.10

В качестве основного недостатка методики выделим неравномерную нагрузку на специалистов: на начальный период основная работа по созданию новой 3D-модели помещений выполняется архитекторами во взаимодействии со строителями. Без актуальных поэтажных планов и модели специалисты по компоновке технологических трубопроводов, трубопроводов систем водоснабжения, канализации, пожаротушения, оборудования вентиляции и отопления и трассировки электрических кабелей не смогут выполнить перекомпоновку систем. Только после выполнения работ архитекторами и строителями, специалисты смогут перекомпоновать системы, а с учетом выполнения работ в сжатые сроки, оставшегося времени для выполнения данной работы становится очень мало, в результате специалисты на конечном периоде времени становятся очень сильно загруженными.

ЛИТЕРАТУРА:

1. 848/2017 Decree of the Ministry of the Environment on Fire safety of Buildings. [Электронный ресурс] / The national building code of Finland, Ministry of the environment, Housing and Building Department // Finland, Ministry of the environment. 2002. – 41 с. URL: https://www.ym.fi/en-US/Land_use_and_building/Legislation_and_instructions/The_National_Building_Code_of_Finland/Fire_safety (дата обращения 01.10.2019).
2. НПБ 114-2002 Противопожарная защита атомных станций. Нормы проектирования. / ГУТПС МЧС России // М., 2003. – 52 с.
3. СНиП 21-01-97 Пожарная безопасность зданий и сооружений (с Изменениями N 1, 2). / Госстрой России. // М.: ГУП ЦПП, 2002.

ГРАДИЕНТНАЯ ТЕПЛОМЕТРИЯ И PIV
В ИССЛЕДОВАНИИ ТЕПЛООБМЕНА И ТЕЧЕНИЯ ВБЛИЗИ ПАРЫ ЦИЛИНДРОВ

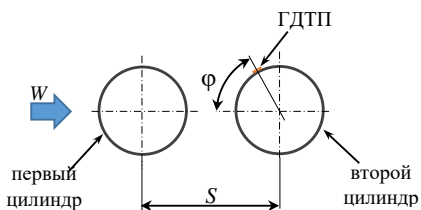
Совместное исследование теплообмена и течения — актуальное направление современной теплофизики. Исследование нестационарных процессов обычно производится методом термоанемометрии, так как тонкая нить зонда термоанемометра обладает необходимым быстродействием. Градиентная теплометрия открывает новые возможности. Градиентные датчики теплового потока (ГДТП), разработанные в научно-образовательном центре «Теплофизика в энергетике» СПбПУ, имеют постоянную времени порядка 10 нс [1], что позволяет использовать их в изучении нестационарных отрывных течений вблизи нагретых моделей.

Предложено экспериментально исследовать отрывное течение и теплообмен вблизи пары цилиндров. Методика включает измерение плотности теплового потока методом градиентной теплометрии и визуализацию поля скорости с использованием PIV.

Поперечное обтекание труб — происходит, в частности, в рекуперативных теплообменниках (кожухотрубных, змеевиковых, типа «труба в трубе» и др.). Поперечное обтекание одиночной трубы исследован достаточно давно и детально [2–4], в том числе и научной группой НОЦ «Теплофизика в энергетике» [5]. На практике эффекты загромождения в трубных пучках обычно рассматривают как «добавки» к закономерностям, установленным для одиночной трубы. В нашем исследовании в качестве модели использованы пара полых цилиндров, обогреваемых насыщенным водяным паром и установленных один за другим в рабочей камере аэродинамической трубы (рис. 1, а).



а)



б)

Рис. 1. Пара цилиндров в рабочей камере аэродинамической трубы(а)
и схема эксперимента (б)

Диаметр цилиндров одинаков и равен: при измерении плотности теплового потока – 66 мм, при визуализации течения – 20 мм. Второй цилиндр мог проворачиваться вокруг оси на угол φ от 0 до 180°. Установка имеет возможность менять расстояние между цилиндрами S перемещением второго цилиндра. На поверхности второго цилиндра установлен ГДТП на основе монокристаллического висмута (рис 1, б). Толщина датчика 0,2 мм, размер в плане 2×2 мм, вольт-ваттная чувствительность - 7,8 мВ/Вт.

Исследования проводились для чисел Рейнольдса $Re = \frac{W \cdot d}{\nu} = 0,48...29,8 \cdot 10^3$, где W –

скорость свободного потока, м/с; d – диаметр цилиндра, м; ν – кинематическая вязкость, м²/с. Шаг измерения платности теплового потока по углу $\Delta\varphi = 5^\circ$. Измерений плотности теплового потока производились с помощью АЦП NI 9216 и в каждой точке составило 1000 раз. Расстояние между цилиндрами S варьировалось в пределах от $(1,5...4,5) \cdot d$. На рис. 2 результаты исследования сопоставлены с данными работы [3].

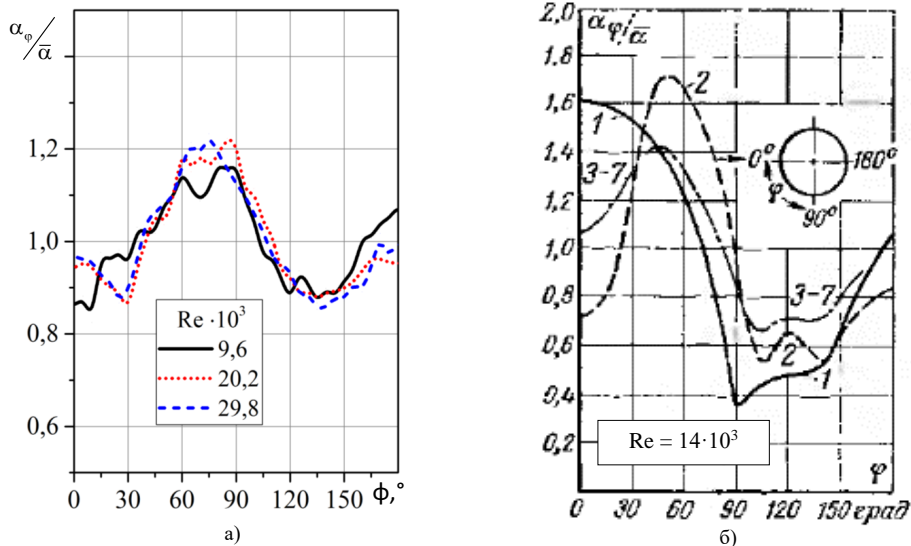


Рис. 2. Распределение безразмерного коэффициента теплоотдачи по поверхности второго цилиндра: авторов (а) и по данным работы [3] (б) (обозначены цифрой 2)

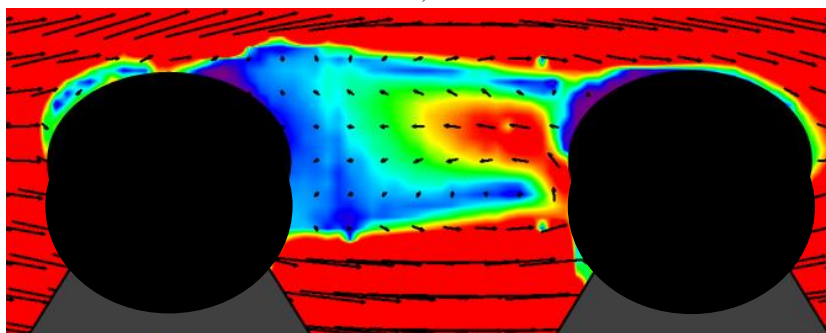
Здесь α_φ и $\bar{\alpha}$, Вт/(м²·К) – местный и осредненный по поверхности коэффициенты теплоотдачи соответственно.

Кривые, полученные методом градиентной теплометрии для второго цилиндра, качественно согласуются с данными авторов [3]. Расхождение можно объяснить разным шагом измерения: в нашей работе он составил 5° , тогда как в работе [3] – 20° .

Структуру потока в следе за первым цилиндром визуализировали методом PIV в классической (двумерной) конфигурации на основе системы ПОЛИС [5]. Получены как мгновенные, так и осредненные по времени поля скорости в следе за первым цилиндром. В исследуемом диапазоне чисел Рейнольдса Re выявлена вихревая дорожка, в области которой находится второй цилиндр. Рис. 3 подчеркивает актуальность и целесообразность использования быстродействующих ГДТП.



а)



б)

Рис. 3. Фотография течения в следе за цилиндром (а) и мгновенное поле скорости (б)
($S = 2,5d$, $Re = 20200$)

Результаты исследования показали, что предлагаемый метод совместного использования PIV и теплотметрии для исследования нестационарного конвективного теплообмена, конкурентоспособен, и его необходимо развивать: например, при исследовании и оптимизации процессов теплообмена и гидродинамики вблизи элементов теплообменников, в проточных частях турбин, компрессоров и других энергетических установок.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сапожников С.З, Митяков Ю.В., Митяков А.В. – Основы градиентной теплотметрии – СПб : Изд-во Политехн. ун-та, 2012 –203 с.
2. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. М.: Наука, 1982
3. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С., Издание 4-е перераб. и дополненное. - М.: «Энергоиздат», 1981. - 415 с. Учебник для технических специальностей высших учебных заведений.
4. Кутателадзе С. С., Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. — М.: Энергоатомиздат, 1990.— 367 с.
5. Гусаков А.А., Греков М.А., Сероштанов В.В. Аэродинамика и теплообмен на поверхности одиночного кольцевого ребра // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2018. Т. 11. № 2. С. 151 – 164. DOI: 10.18721/JPM.11214

СООТВЕТСТВИЕ РАДИОНУКЛИДНОГО СОСТАВА ОБЛУЧЁННОГО ГРАФИТА УРАН-ГРАФИТОВЫХ РЕАКТОРОВ КРИТЕРИЯМ ПРИЕМЛЕМОСТИ ПРИ ТРАНСПОРТИРОВАНИИ РАДИОАКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Введение. В настоящее время планируется постепенный вывод из эксплуатации всех энергоблоков с реакторами типа РБМК. Во время работы этих реакторов графитовый замедлитель активировался и загрязнялся радиоактивными элементами. Необходимо исследовать состав и активность графитового замедлителя для решения вопросов по безопасному обращению с ним.

Актуальность. основополагающие документы, определяющие принципы обеспечения безопасности, как при использовании атомной энергии в общем случае, так и во время завершающей стадии жизненного цикла объектов использования атомной энергии – выводе из эксплуатации и обращении с радиоактивными отходами (РАО), формируют факторы, накладывающие ограничения на транспортируемое радиоактивное содержимое (которым в данном случае является облучённый графит) с точки зрения ядерной и радиационной безопасности. Соблюдение данных требований является основополагающей целью при дальнейшей разработке контейнера для обращения с облучённым графитом.

Цель работы. Обобщение имеющихся экспериментальных и теоретических данных о радионуклидном составе облучённого графита различных уран-графитовых реакторов (исследовательских, промышленных, энергетических) и проверка на соответствие критериям приемлемости при транспортировании радиоактивных материалов (РМ) различных компоновок графитовых блоков.

Для осуществления транспортировки и обоснования возможности хранения демонтируемой графитовой кладки, необходимо проверить состав образующихся радиоактивных материалов на соответствие требованиям, установленным в документах, регламентирующих обращение с РАО на стадии временного хранения и транспортировки. В данных нормативных документах установлены следующие ограничения:

– ограничение годовой эффективной дозы облучения персонала за счёт нормальной эксплуатации техногенных источников ионизирующего излучения: 20 (50) мЗв/год [1],

– ограничение максимального значения мощности дозы излучения:

– до 10 мЗв/ч на поверхности упаковки (аварийный случай);

– 1 мЗв/ч на поверхности упаковки; 0,1 мЗв/ч на расстоянии 1 м от внешней поверхности транспортного средства [2].

– ограничение мощности поглощенной дозы на поверхности упаковки:

– II класс РАО – не регламентируется, III класс – 10 мГр/ч, IV класс – 2 мГр/ч [3].

Также необходимо обратить внимание на техническую сторону вопроса, которой являются массогабаритные характеристики разрабатываемого контейнера. При разработке контейнеров, транспортируемых железнодорожным транспортом, необходимо учитывать габариты погрузки на железнодорожную платформу. Максимальная нагрузка на железнодорожную платформу – 70 тонн. Ограничения по габаритам перевозимых грузов – 3400×3250×20000 мм [4]. Исходя из этого требования определена загрузка графитовых блоков в предполагаемый контейнер, равная 35-147 блоков на 1 контейнер.

Были найдены и проанализированы исследования радиационных характеристик радиоактивно-загрязнённого графита различных научно-исследовательских институтов:

- Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежале («НИКИЭТ») [5];
- Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» (НИЦ «КИ») [6, 7];
- Томский политехнический институт (НИ ТПУ) [8];
- Всероссийский проектный и научно-исследовательский институт комплексной энергетической технологии («ВНИПИЭТ») [9].

Дальнейшие исследования основываются на результатах данных исследований и носят оценочный характер, так как для точных расчётов необходимо знать радиационные характеристики графитовой кладки конкретных энергоблоков. Для этого, в целях обеспечения радиационной безопасности при выполнении работ по демонтажу графитовой кладки реактора, целесообразно выполнить на этапе подготовки к выводу из эксплуатации, после окончательного останова блока, инструментальное радиационное обследование графитовой кладки с целью определения активности, количества и локального распределения продуктов деления ядерного топлива, попавших в кладку реактора для принятия проектных решений о его последующем удалении и обращении с ним.

Согласно [2] необходимо соблюдение требований к удельной активности нуклидов, входящих в состав транспортируемых радиоактивных материалов. В данном документе установлено отношение (1):

$$\sum_i \frac{Q_i}{A_{2i}} < 1, \quad (1)$$

где Q_i – активность i -ого радионуклида, A_{2i} – предельно допустимая активность этого нуклида согласно [2]. Несоблюдение данного условия влечёт за собой невозможность транспортирования данного вида радиоактивных материалов до тех пор, пока уровень активности не будет соответствовать установленным требованиям. На рис. 1 представлен график изменения пределов активности и ограничения в отношении материалов для каждого исследования в границе от 5 до 20 лет выдержки графитового замедлителя.

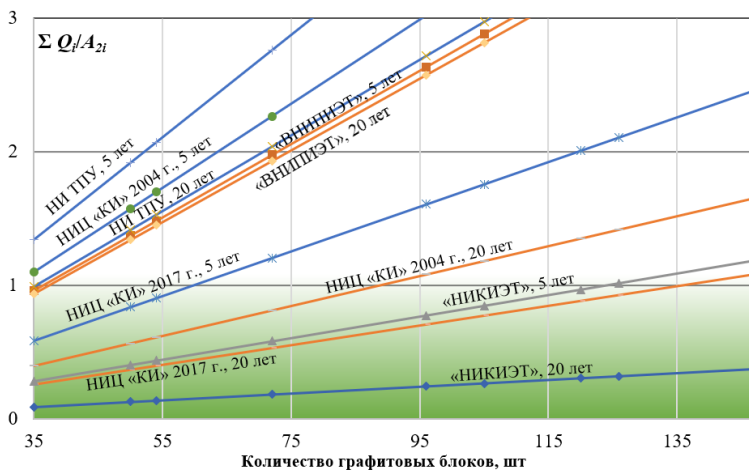


Рис. 1. Зависимость изменения фактора (1) от величины загружаемой активности на период выдержки 5 – 20 лет для проведённых исследований

Так как ориентировочный срок демонтажа графитовой кладки намечен на 2038-2040 гг. (согласно [10]), а неотложный демонтаж можно осуществить в течение ближайших 5 лет, то наиболее важными для расчёта вариантами являются граничные варианты, т.е. время выдержки равное 5 и 20 годам.

Выводы. После обобщения имеющихся данных по радионуклидному составу облучённого графита и проверки на соответствие одному из основных критериев приемлемости РМ при транспортировании РАО, была получена зависимость отношения нормативных значений активности определённых нуклидов к имеющимся. Согласно данной зависимости, компоновка в 35 блоков проходит по требованиям [2] практически для всех изученных составов. Стоит отметить, что компоновки блоков с составом, соответствующим исследованиям [5], практически в полном объёме удовлетворяет вышеупомянутым требованиям.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009), 2009. – 86 с.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Правила безопасности при транспортировании радиоактивных материалов» (НП-053-16), 2016. – 174 с.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» (НП-093-14), 2014. – 23 с.
4. ГОСТ 9238-2013 Габариты железнодорожного подвижного состава и приближения строений. Межгосударственный стандарт. 2014. – 177 с.
5. М.А. Туктаров, Л.А. Андреева, А.А. Роменков. Кондиционирование реакторного графита выводимых из эксплуатации уран-графитовых реакторов для целей захоронения. РАС, Москва. 2016. – 23 с.
6. Былкин Б.К., Давыдова Г.Б., Краюшкин А.В., Шапошников В.А. Радиационные характеристики облучённого графита после окончательного останова АЭС с РБМК. Атомная энергия. 2004. Т. 97. № 6. – Москва, 2004. – с. 451-457.
7. Бурлаков Е.В., Г.Б. Давыдова, Л.Н. Захарова, А.В. Краюшкин. Расчёты радиационных характеристик облученного графита реакторов РБМК. НИЦ «Курчатовский институт», Москва, 2017. – 17 с.
8. И.Ю. Новоселов, С.В. Макаревич, Е.Ю. Давыдов. Оценка состояния радиоактивных микропримесей в облученном графите уран-графитовых ядерных реакторов. Радиоактивность и радиоактивные элементы в среде обитания человека / Материалы V Международной конференции. ФГАОУ ВО "НИ ТПУ", Томск, 2016. – с. 465-468.
9. Симановский В.М. Безопасность консервации и демонтажа промышленных ядерных реакторов: автореферат, Санкт-Петербург, 1998. – 23 с.
10. Программа вывода из эксплуатации блока №1 Ленинградской АЭС. Сосновый Бор, 2017. – 165 с.

УДК 62-932.2

Х.М. Аль-Зувайни, С.В. Скулкин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ ВОЗДУХА В СТРАНАХ СРЕДНЕГО ВОСТОКА

В опубликованной ранее статье [1], авторами была предложена и аналитически обоснована возможность использования грунтового массива для геотермального кондиционирования воздуха в странах Среднего Востока отличающихся жарким и засушливым климатом.

С целью практического подтверждения ранее полученных результатов, в программе ANSYS FLUENT 6.3 была разработана модель грунто-воздушного теплообменника (ГВТ)

(рис. 1). Для корректного составления модели и задания граничных условий [2, 3] были проведены геологические изыскания в зоне размещения ГВТ с определением физических свойств грунта. Результаты учтены в разработанной модели.

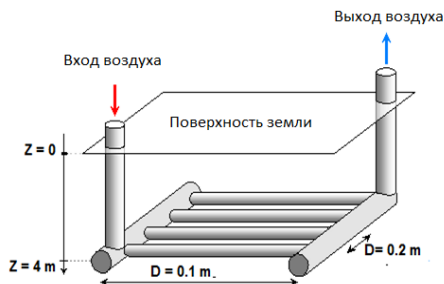


Рис 1. Схема грунто-воздушного теплообменника

По результатам моделирования был сконструирован и смонтирован ГВТ (рис. 2) для проведения натурных испытаний в окрестностях г. Басра, Республика Ирак. Для качественной работы ГВТ было выполнено послойное уплотнение грунтов основания и обратной засыпки с коэффициентом уплотнения не менее 0,95.



Рис 2. Изготовление и монтаж грунто-воздушного теплообменника

На протяжении 2018 г. проводились натурные испытания ГВТ, по результатам которых была подтверждена адекватность электронной модели и доказана эффективность технологии.

Отводящие и подводящие трубопроводы были оснащены датчиками температуры воздуха. Скорость воздуха поддерживалась постоянной и контролировалась анемометром в выходной камере теплообменника.

Полученные графики изменения температуры воздуха на входе и выходе из теплообменника, температуры грунта демонстрируют эффективность ГВТ как для нагрева воздуха в наиболее холодные периоды года (рис. 3), так и для его охлаждения в наиболее жаркие периоды (рис. 4). Причем, плотный грунт обладает достаточно высокой теплопроводностью и теплоемкостью, чтобы максимально сглаживать температурный режим ГВТ – по результатам испытаний температура грунта в районе заложения ГВТ, ближе к выходному патрубку, практически неизменна.

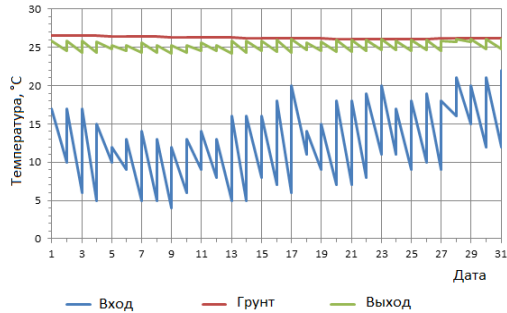


Рис 3. Результаты измерений в январе 2018 г.

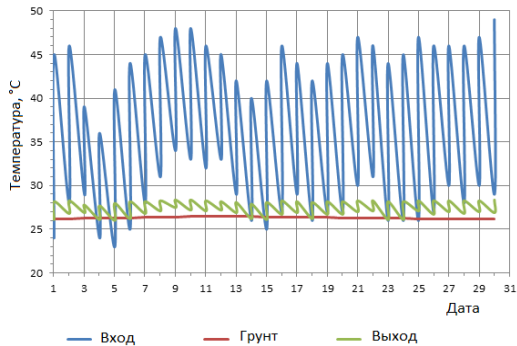


Рис 4. Результаты измерений в июне 2018 г.

Полный диапазон изменения среднесуточной температуры на выходе из ГВТ составил всего 4 °С. Для среднечасовой температуры диапазон не превысил 6 °С.

Полученные результаты позволяют сделать выводы:

1. Численное моделирование ГВТ дает корректные результаты, подтверждаемые экспериментом. Качество модели обеспечивается точным заданием физических свойств грунтов, определяемых в ходе геологических изысканий.
2. Необходимым условием работы ГВТ является качественное послойное уплотнение грунтов основания и обратной засыпки.
3. Физические свойства грунтового массива хорошо подходят для кондиционирования приточного воздуха как в холодный, так и в жаркий период года в странах с жарким и засушливым климатом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Х.М. Аль Зувайни. С.В. Скулкин. Эффективность геотермального охлаждения приточного воздуха в странах Среднего Востока. Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г., Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – С. 89-91.
2. Labs K. In: Cook J, editor. Passive cooling. Cambridge Massachusetts, London, England: MIT Press; 1989.
3. Hanby V.I., Loveday D.L. and Al-Ajmi L. (2005) The optimal design for a ground cooling tube in a hot, arid climate. Building Service Eng. Res. Technol. 26,1 pp 1-10.

DRY ANAEROBIC DIGESTION TECHNIQUE FOR BIOGAS PRODUCTION AND THE DIAPHRAGM PUMP APPLICATIONS

Introduction.

Biogas is a renewable energy (see biogas properties in Table 1), which can obtain from various kinds of organic wastes. Biogas has many applications in the field of agriculture and energy. The rate of production of biogas is depending on type of organic waste and variable temperatures.

Table 1. Composition of biogas [1]

Constituents	Composition (%)
Methane	50-75
Carbon dioxide	25-45
Nitrogen	<2
Water vapour (moisture)	2-7
Hydrogen sulphide	20-20,000 ppm

Methane is the only combustible gas in biogas. Hydrogen sulphide is less than one percent in biogas but it is poisonous and harmful for metallic parts. There are methods to remove hydrogen sulphide from biogas. Carbon dioxide is in biogas it can easily remove by water and chemical scrubbing. Water vapour is also necessary to remove by absorption method by using silica gel. More than 90% methane in biogas called biomethane [2].

The temperature is important factor in biogas production; the bacteria cannot grow in very cold environment. There are two temperature range mesophilic (30-40°C) and thermophilic (50-60°C) [3].

Dry anaerobic digestion.

The anaerobic treatment of solid substrates containing dry matter i.e. total solids (TS) contents between 15 and 45% [4]. Nature of slurry will be semi solid because less amount of water.

Advantages of dry anaerobic digestion: High biogas production rate, It can be use in small and compact digesters because material needs not be diluted, Less water consumption but depending on material characteristics

Experimental work carried out on biogas production using dry anaerobic digestion.

Material: Cattle dung, water, liquid anaerobic bacteria. Diagram is shown in Figure 1.

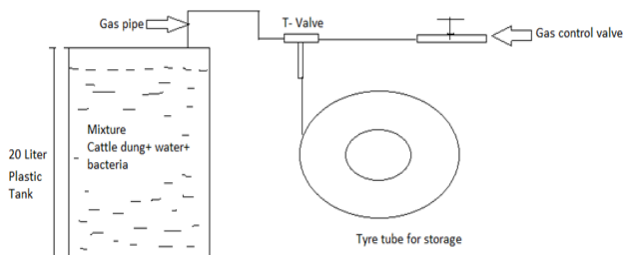


Fig 1. Complete experimental assembly for test

Observation: After three days the tube becomes inflated. Temperature in surrounding, at day time was 40-43°C, at night 28-30°C.

Testing and calculation: Blue flame indicates, biogas is formed successfully in three days. Dry matter in cattle dung is 20-25% [3].

In 16.5 kg of cattle dung, 25% is dry matter (Take a value of dry matter between 20-25%)

$$0,25 \times 16,5 = 4,125 \text{ kg} \quad (1)$$

Total contents in tank are 20 kg (16.5 kg cattle dung+ 3.5 kg water and bacteria)

From (1),

$$\frac{4,125}{20} \times 100 = 20,625\% (15-45\%) \quad (2)$$

Diaphragm pump:

It is suitable for abrasive, corrosive solutions, handle highly viscous liquids, can be up to 97% efficient [5]. This pump (shown in Fig. 2) will work on solar charged battery (see Fig. 3).



Fig 2. Diaphragm pump model



Fig 3. Charging 12v battery by using solar panel

Applications of diaphragm pump in biogas purification process (see Fig. 4 for diagram and Table 2 for filter information):

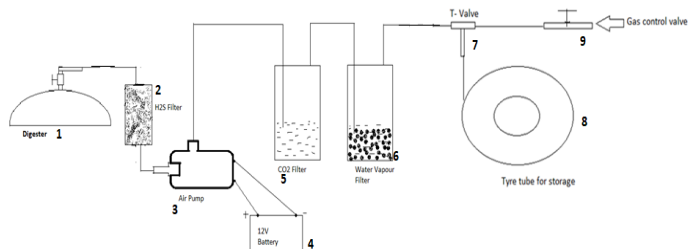





Fig 4. Assembly of filter and pump for purification and storage of biogas. 1. Digester, 2. H₂S filter, 3. Diaphragm pump, 4. 12v battery, 5. CO₂ filter, 6. Water vapour filter, 7. T- valve, 8. Tyre tube, 9. Gas control valve

Table 2: Information about filters [6]

Filter	H ₂ S filter	CO ₂ (Carbon dioxide filter)	Water vapour filter
Picture			
Material	Steel wool	Calcium hydroxide with water	Silica gel
Chemical reaction	$\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$ $2\text{Fe}_2\text{S}_3 + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 6\text{S}$	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	-----

Results and discussion. From the experimental point of view the biogas produces in three days by using dry anaerobic digestion technique containing 20,625% dry matter. The diaphragm pump is convenient to use in various ways like in purification process of biogas, domestic use in cooking and in small power generation.

Conclusion. Dry anaerobic digestion technique is easy and simple to use in biogas production in rural areas. It helps for water conservation also. Diaphragm pump works on battery which can charge by solar power. The bio and solar energy can work together.

REFERENCES:

1. Kaltschmitt, M.; Hartmann, H.: *Energie aus Biomasse –Grundlagen, Techniken und Verfahren*; Springer Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, 2001.
2. Al Mamun, Muhammad Rashed; Torii, Shuichi (2017). "Enhancement of Methane Concentration by Removing Contaminants from Biogas Mixtures Using Combined Method of Absorption and Adsorption". *International Journal of Chemical Engineering*.(2017): pp:1–9.
3. Guide to biogas from production to use, 5th, completely revised edition, Gülzow, supported by: Federal ministry of food, agriculture and consumer protection, Germany, The English version of the "Leitfaden Biogas" was jointly financed by the following Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) projects,(2010), pp 229
4. Steve Last (21-5-2016). eBook on 'Dry anaerobic digestion secretes', 'Dry AD plants'(Date of publishing 21.05.2016), (19-Aug-2000). Updated (5-Aug-2018).
5. Mechanical diaphragm pump, Integrated Publishing, Inc. <http://www.tpub.com> (12-Dec-1998) 9438 US Hwy 19N. #311, Port Richey, FL 34668
6. Shah Divyang R, Nagarsheth Hemant J and Acharya Pradeep ,Purification of Biogas using Chemical Scrubbing and Application of Purified Biogas as Fuel for Automotive Engines. *Research Journal of Recent Sciences E-ISSN 2277-2502 Res. J. Recent. Sci., Vol. 5(ISC-2015), (2016) pp:1-7*

УДК 62-932.4

A.A. Patil, E.A. Sokolova
Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

GENERATING ELECTRICITY THROUGH PEDAL POWER BY USING VARIOUS DRIVES AND CALCULATING POWER ACCORDING TO GENERATOR SPECIFICATIONS

Introduction. The pedal operated power generator utilizes human energy to produce electricity quickly and efficiently. The goal is to provide technological solution to problem in the rural world by using detailed opportunity recognition, evaluation, and development of prototype. Some applications include pedal powered laptops, pedal powered grinders and pedal powered water wells. Some third world development projects currently transform used bicycles into pedal powered tools for sustainable development [1, 2]

Materials and Methods. The Pedal Operated Power Generator (for scheme see Fig. 1) is a type of generators in which the source of mechanical power is provided by the human effort while spinning a shaft [3].

Gear drive:

Design of pedal power generator by using gear drive

$N_1 = 24$ rpm, $N_4 = 2400$ rpm

Gear Ratio: The gear ratio is also known as its speed ratio, is the ratio of the angular velocity of the input gear to the angular velocity of the output gear. Mathematically, $\frac{N_2}{N_1} = \text{Gear ratio}$, where N_1 : Speed of gear, N_2 : speed of pinion. To select a gear ratio in such a way that the output speeds would be 2400 rpm from input speed 24 rpm.

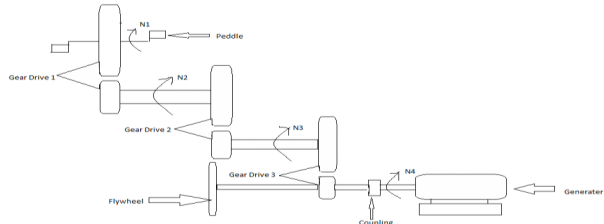


Fig 1: Sketch of pedal power by using three stage gear drive

In First stage,

$$N_2/N_1=5$$

$N_2=24 \times 5= 120\text{rpm}$ in second stage,

$$N_3/N_2=5$$

$N_3= 120 \times 5= 600 \text{ rpm}$

In third stage,

$$N_4/N_3=4$$

$N_4=600 \times 4= 2400 \text{ rpm}$ [5].

Generator Specification and selection criteria. The view of chosen generator is shown in the Fig .2, its characteristics could be found in the Fig. 3.



Fig 2. 12V / 24V DC permanent magnet motor generator for wind turbine PMA 350 W

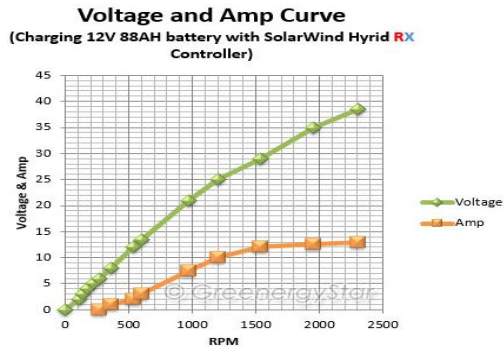


Fig 3. Generator curve

From the Fig 3:

At 500 rpm: 2.5 amp, 14V

At 1000 rpm: 8 amp, 21V

At 2000 rpm: 13 amp, 35V
 At 2400 rpm: 14 amp, 38V
 Shaft diameter 11.1 mm
 Voltage: 12/24 V, Weight: 1.94 kg, Body Material: Aluminium alloy and steel
 At 2400rpm,
 For one hour constant speed: 14 amp, 38V
 Watts-hour: 14×38= 532Wh
 Similarly,
 At 500 rpm: 35Wh, At 1000 rpm: 168Wh, At 2000 rpm: 45Wh
 To find torque at variable speed [5]:

$$\frac{P \times 60}{2 \times \pi \times n} = T \tag{1}$$

T- Torque, P- Power, n- speed, (rpm), $\pi - 3.142$

At 2400 rpm,

$$T = \frac{532 \times 60}{2 \times \pi \times 2400} = 2.11\text{nm} \tag{2}$$

Similarly,

At 500 rpm, T= 10.16nm, At 1000 rpm, T= 5.08nm, At 2000 rpm, T= 2.54nm

Spur Gear drive and Chain drive:

Spur gears have their teeth parallel to the axis and are used for transmitting power between two parallel shafts. They are used in high speed and high load application in all types of trains and a wide range of velocity ratios [5].

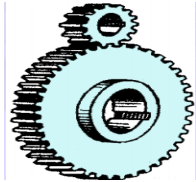


Fig 4. Spur Gear drive



Fig 5. Single stage chain drive

Chain Drive:

Chain drives are used to transmit rotational motion or torque from one shaft to another shaft smoothly and inexpensively.

Results and discussion.

Table 1. Final results of calculation

Speeds, rpm	Voltage, V	Current, A	Watts-hour	Torque, nm
500	14	2.5	35	10.16
1000	21	8	168	5.08
2000	35	13	455	2.54
2400	38	14	532	2.11

It gets 532 Watts-hour; in that amount of power we can run 8 LED lights each of 9 watts, 8*9=72 watts. 532/72=7hr30min. In just one hour of pedalling at constant speed it can get that much amount of power for household utilization in rural areas.

Conclusion. The device is environmentally friendly as it produces no waste in the process of its operation. The system proved efficient since even with a minimum pedalling speed, the system produced enough voltage required to charge the battery in order for the system to be usable by almost anybody at any time.

REFERENCES:

1. Atkinson, C. J. and Brooks, L. (2005) In the Age of the Human chine, In Proceedings of International Conference on Information Systems (ICIS), AIS, Las Vegas, USA.
2. D. G. Wilson, Understanding Pedal power, Technical paper 51, ISBN: 0-86619-268-9, 1986.
3. <https://www.ebay.com/itm/FreeEnergy-12V-24V-DC-Permanent-Magnet-Motor-Generator-for-3-Wind-Turbine-PMA-350W> (1995)
4. A. H. George, Design of a Human-Powered Generator using Recumbent- Bicycle Technology, B-Eng project, Massachusetts Institute of Technology, 1988.
5. Khurmi, R. S. and Gupta, J. K. (2012) Theories of Machine', S.chand & company Ltd, New Delhi, Chapter 11, 331 – 330.

УДК 621.039.74

И.А. Степанов, Е.Д. Федорович, А.В. Ившин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

К ВОПРОСУ О ВЫБОРЕ КОНСТРУКЦИИ ТРАНСПОРТНОГО КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ВЫВОЗА ОБЛУЧЁННОГО ГРАФИТОВОГО ЗАМЕДЛИТЕЛЯ С ПЛОЩАДОК АЭС С РЕАКТОРАМИ ТИПА РБМК НА ЭТАПЕ ИХ ВЫВОДА ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Введение. Проблема вывода из эксплуатации (ВЭ) отечественных ядерных реакторов типа РБМК-1000 является новой - первый энергоблок (ЭБ) АЭС с этим реактором был остановлен на Ленинградской АЭС в декабре 2018 года, а также весьма сложной - как в силу отсутствия опыта такого вывода, так и в силу многих технических трудностей, которые предстоит преодолеть при ВЭ. Одной из сложнейших задач при этом является обращение с облученным графитовым замедлителем (ОГЗ) которого очень много по массе (~1400 тонн на один реактор) и который содержит высокоактивный изотоп углерода C-14 с периодом полураспада 5760 лет. В принципе возможны два пути обращения с ОГЗ - захоронение на месте (без демонтажа) и демонтаж с последующим вывозом с территории АЭС в место длительного приповерхностного или подземного хранения (захоронения). По нашему мнению, первый путь нецелесообразен и даже не допустим, ибо под действием коррозионных процессов или других неблагоприятных факторов (вплоть до злого умысла) высокоактивный материал может попасть в окружающую среду на объекте, расположенном в 60 км от городской черты крупнейшего мегаполиса - города Санкт-Петербурга. Остаётся второй путь - вывоз с территории АЭС, для чего и нужно разработать специальные контейнеры. Теме выбора конструкции контейнера для транспортного-упаковочного комплекса (контейнер+содержимое) ТУК-Графит посвящён настоящий доклад.

1. Проблемы вывода из эксплуатации энергоблоков АЭС с реакторами РБМК. Подходы к её решению.

На всех российских АЭС с ядерным реактором типа РБМК (Ленинградская, Курская и Смоленская) разработаны исходные основополагающие документы - "Программы ВЭ", обсуждены сопряжённые с этим проблемы (см., например, [1]). После примерно пятилетней выдержки после останова реактора и извлечения из него всех технологических каналов (вместе с тепловыделяющими сборками) должен начаться демонтаж активной зоны реактора, основными (по массе) компонентами которой являются упомянутый замедлитель (~1400

тонн), отражатель (~400 тонн - он также графитовый) и металлоконструкции реактора. ОГЗ представляет собой колонны из графитовых кирпичей. На этапе демонтажа ОГЗ графитовые блоки должны быть выгружены из реактора - для этого потребуются специальная робототехника и манипуляторы, ибо эти блоки весьма β -активны. Кроме того, графит ОГЗ содержит примеси разных изотопов цезия, кобальта и других элементов, которые также активны и требуют защиты персонала и окружающей среды (см. таблицу 1, [2]).

Таблица 1. Изотопный состав облученного графитового замедлителя (пример промышленного уран-графитового реактора (ПУГР))

изотоп	активность, Бк	изотоп	активность, Бк
^3H	$5,9 \times 10^{14}$	^{90}Sr	$1,9 \times 10^{12}$
^{14}C	$1,9 \times 10^{15}$	^{93}Nb	$1,6 \times 10^{12}$
^{36}Cl	$1,8 \times 10^{12}$	^{94}Nb	$1,4 \times 10^{11}$
^{41}Ca	$7,8 \times 10^{11}$	^{133}Ba	$6,2 \times 10^{10}$
^{55}Fe	$9,6 \times 10^{13}$	^{134}Cs	$5,0 \times 10^{12}$
^{59}Ni	$7,8 \times 10^{11}$	^{137}Cs	$1,7 \times 10^{12}$
^{60}Co	$1,2 \times 10^{13}$	^{144}Ce	$1,6 \times 10^{12}$
^{63}Ni	$1,1 \times 10^{13}$	^{152}Eu	$9,4 \times 10^{10}$
^{65}Zn	$3,9 \times 10^{13}$	^{154}Eu	$8,3 \times 10^{10}$

2. Характеристики облученного графитового замедлителя реакторов типа РБМК

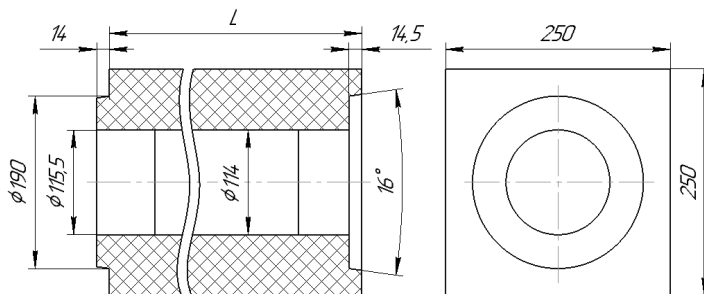


Рис. 1. Блок графитового замедлителя

Размеры графитовых блоков представлены на рисунке 1, где высота L может быть от 250 до 600 мм – в зависимости от расположения в реакторе. Масса блока от 20 до 52 килограмм. Кроме того, следует иметь в виду, что по данным исследований, уровень активности различных блоков сильно отличается - в зависимости от местоположения в активной зоне, расстояния от места "мокрой" аварии [3].

В связи с этими различиями целесообразно проведение сортировки блоков ОГЗ по уровню активности после их выгрузки из активной зоны. В частности, заметим, что имеется мнение специалистов СПб Технологического Университета (В.А. Доильницын и др.) о целесообразности не вывозить с площадки АЭС блоки ОГЗ низкой активности, о использовании их полезным образом в виде материала, сорбирующего активные примеси при обращении (переработке) жидких радиоактивных отходов на ЛАЭС. Следует заметить

также, что часть блоков была повреждена при ремонте (расточка отверстий под ТК - в каждом блоке есть такие отверстия диаметром ~115 мм) графитовой кладки [4]. При этом "крошка" графита (т. н. "просьпы") также должна быть собрана и удалена с территории АЭС (в тех же контейнерах). Наконец, во время ремонта часть деталей канала (втулки, кольца) были заменены. Следовательно, удалённые детали (сейчас они хранятся на складе твердых радиоактивных отходов) также подлежат вывозу в ТУК-Графит [5].

3. Возможные конструкции для транспортирования ОГЗ. Сравнение различных материалов корпуса контейнера

Материал корпуса - бетон, нержавеющая сталь, углеродистая сталь, высокопрочный, высокопластичный чугун. Бетон - дешёвый, непрочен, недолговечен. Сталь углеродистая – дешёвая, не годится для низких температур (хладноломкость). Сталь нержавеющая – дорогая, требует сварки, термообработки, зачистки швов. Лучше всего чугун – технологичен (изготовление корпуса одним этапом - отливкой), пластичен, не боится коррозии.

Выводы

1. Следует вывезти ОГЗ в транспортных контейнерах.
2. Поскольку блоки ОГЗ имеют вид параллелепипедов, то целесообразно создать транспортные контейнеры для них в виде "ящика".
3. Необходимо создать алгоритмы расчёта биозащиты и динамической прочности для разрабатываемого транспортного контейнера ТУК-Графит.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Симановский В.М., Амелогова Н.И., Крицкий В.Г. и др. Проблемы дезактивации на этапах подготовки блоков Ленинградской АЭС к выводу из эксплуатации и длительному сохранению под наблюдением // Атомная энергия. 1998.-Т. 85. - Вып. 8.
2. Симановский В.М. Ядерные технологии и экология топливного цикла. Основные проблемы и принципы вывода из эксплуатации уран-графитовых реакторов: Учеб. пособие. СПб.: Издательство СПбГПУ, 2003. – 42 с.
3. Чернобыльская авария: дополнение к INSAG-1 INSAG-7. Доклад Международной консультативной группы по ядерной безопасности. — Вена: МАГАТЭ, 1993.
4. Кудрявцев К.Г. Восстановление ресурсных характеристик графитовой кладки реактора энергоблока №1 Ленинградской атомной электростанции. Доклад на конференции «МНТК-2014»
5. Былкин Б.К., Давыдова Г.Б., Краюшкин А.В., Шапошников В.А. Радиационные характеристики реакторных конструкций после окончательного останова АЭС с РБМК // Атомная энергия, т. 97, вып. 6, декабрь 2001,

УДК 628.194

Я.А. Владимиров, О.В. Новикова, В.В. Сероштанов, В.В. Сучок
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРИЧИНЫ УХУДШЕНИЯ КАЧЕСТВА ГОРЯЧЕЙ ВОДЫ В ОТКРЫТОЙ СИСТЕМЕ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА КИРОВСКА

При переключении потребителей тепла и горячего водоснабжения города Кировска от локальных котельных к Апатитской ТЭЦ в 2013 году, эксплуатирующие организации столкнулись с проблемой периодического ухудшения качества горячей воды, поставляемой потребителям – появление неприятного запаха, ухудшение органолептических показателей. Переключение источников тепловой энергии также повлекло за собой изменение источника сырой воды для подпитки тепловых сетей. Ранее вода забиралась из оз. Большой Вудъявр, в данный момент источником подпитки тепловых сетей является Имандровское водохранилище. При использовании в качестве источника подпитки оз. Большой Вудъявр

описанная выше проблема не наблюдалась. Таким образом, ухудшение органолептических свойств горячей воды у потребителей можно однозначно связать со сменой источника и несоответствием существующей системы водоподготовки составу воды из нового источника.

Изучив протоколы анализов сырой воды из обоих источников, а также в точках системы теплоснабжения, авторы обращают внимание на следующие факторы:

1. В целом, согласно представленным протоколам отбора проб из тепловой сети в различных ее точках, качество горячей воды в целом соответствует нормам СанПиН 2.1.4.1074-01. Незначительные отклонения по показателям фиксировались в 2018 году. Зафиксированы отклонения в различных точках по показателям: Железо, Цветность, Мутность и рН. Следует отметить, что данные превышения незначительны и составляют не более 20%, многократного превышения контролируемых показателей воды зафиксировано не было. В 2019 году фиксировалось превышение показателя «Цветность» в точке отбора «2 контур ЦТП г. Кировска подпитка» (10.06.2019), ТНС №3а прямая (10.06.2019), вход на ТНС №4 (27.06.2019, 28.06.2019). Также было зафиксировано превышение значения рН (вплоть до 9,2) в ряде точек отбора. Также, как и в 2018 году, все зафиксированные превышения незначительны и составляют не более 25%, многократного превышения контролируемых показателей воды зафиксировано не было.

Какой-либо системности в появлении отклонений от нормируемых показателей в различных точках системы теплоснабжения выявить не удалось. В большинстве случаев, повторная проба, отобранная через неделю, показывала, что показатели воды возвращаются в норму.

Таким образом, появление отклонений показателей горячей воды от нормируемых происходит эпизодически, лавинообразно, кратковременно и бессистемно.

2. По итогам проведения сравнительного анализа сведений о качестве воды Имандровского водохранилища и оз. Б. Вудъявр, можно утверждать, что качество забираемой из источников водоснабжения воды соответствует СанПиН 2.1.4.1074-01. Сравнение характеристик воды из двух источников показало, что общая минерализация природной воды оз. Б. Вудъявр в среднем в 2 раза выше, чем у воды оз. Имандра. Перманганатная окисляемость в 2 раза ниже, ПАВ (анионоактивные) в 2 раза выше, Алюминий в 8 раз выше, Железо в 10 раз выше, Марганец в 5 раз выше, Нитраты в 50 раз выше, Сульфаты в 1,5 раза выше, Фториды в 6 раз выше, также в пробах воды оз. Б. Вудъявр обнаружены общие термотолерантные колиморфные бактерии.

Результаты сравнительного анализа позволяют говорить о том, что вода из данных источников полностью соответствует требованиям СанПиН 2.1.4.1074-01, более того, контролируемые показатели ниже предельно допустимой концентрации многократно. Все же стоит отметить, что по сравнению с водой из оз. Б. Вудъявр, вода из действующего источника водоснабжения г. Кировска имеет в 2 раза меньшую минерализацию и 2 раза большую окисляемость. Озеро Имандра богато планктоном, который может откладываться в тепловых сетях составлять органическую базу для питания микроорганизмов, обитающих в трубопроводах.

Таким образом, на основании проведенного сравнительно анализа можно утверждать, что в системе теплоснабжения г. Кировска имеют место последствия бактериологической коррозии трубопроводов. Результат деятельности колоний анаэробных бактерий, обитающих на стенках трубопроводов приводит к увеличению концентрации в воде сероводорода и железа и, как следствие, к появлению запаха, цвета и мутности в воде в точках водозабора. Последствия коррозии стали особо заметны при смене источника, так как исходная вода имеет в 2 раза большую окисляемость и содержит множество органики, что позволило создать благоприятные условия для жизнедеятельности анаэробных бактерий.

К основным, видимым для потребителей, последствиям бактериологической коррозии тепловых сетей можно отнести:

1. Периодически возникающий гнилостный запах воды у потребителей;
2. Периодическое увеличение концентрации железа в воде у потребителей;
3. Как следствие из п. 2, ухудшение качества воды у потребителей по показателям Цветность и Мутность;
4. Наличие на внутренней поверхности тепловых сетей биопленки, окрашивание пораженной поверхности в зеленый, коричневый, черный или коричнево-красный цвета, рыхлые и пористые продукты коррозии, появление на стенках трубопроводов язв (вплоть до свищей) и наростов.

Опираясь на индикаторы, приведенные выше, можно выяснить, насколько сильна бактериальная коррозия: чем больше признаков из списка наличествует в системе, тем более она вероятна. Авторы работы [1] отмечают, «что в чистой воде и, в частности, в водопроводных трубах основная роль бактериальных обрастаний принадлежит железобактериям. Нитчатые железобактерии, относящиеся к родам *Leptothrix* и *Srenothrix*, представляют собой палочковидные клетки, соединенные в неветвящиеся нити, одетые слизистой капсулой. Отмечались случаи, когда массовое развитие железобактерий в речных водах вызывало полную парализацию систем водообеспечения. Эти бактерии оседают на стенках труб, снижая их проходное сечение. В теплообменных аппаратах нарушается тепло-гидравлический режим.» Так же микроорганизмы обрастаний часто вызывают коррозию металлов, а продукты их выделения, могут вызывать коррозию бетона.

Механизм развития данного явления описан в статье В.И. Шаропова, Е.А. Астафьева, А.А. Суворова «Предотвращение бактериологического загрязнения трубопроводов тепловых сетей» [2]. Анаэробные организмы развиваются в среде без доступа кислорода с pH 4-10, образуя колонии из нескольких разных типов бактерий, которые включают в себя железобактерии, сульфатредуцирующие бактерии и тионовые бактерии, защищённые слизистой оболочкой, что предотвращает смывание водой.

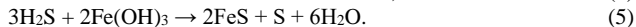
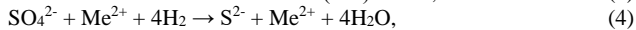
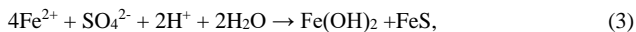
Коррозионный процесс начинается с образования налёта, слизистых скоплений или каверн на металлических поверхностях. Пораженные участки труб хуже аэрируются и оказываются изолированными от воды, из-за чего образуются зоны с разной степенью аэрации, что ведет к выполнению зонами обитания бактерий функций анода, а «чистых» зон функций катода, в следствии чего протекают реакции (формула 1, 2).



В ходе жизнедеятельности железобактерии окисляют двухвалентное железо до трехвалентного, которое в свою очередь образует гидроксид железа, что увеличивает рост отложений и разность потенциалов и ведет к ускорению коррозии. Данные участки труб оказываются изолированными от доступа кислорода, что создает благоприятные условия для сульфатредуцирующих бактерий.

Данный тип бактерий поглощает сульфаты и выделяют сероводород, который реагирует с продуктами коррозии и образует сульфиды. Затем в следствии роста колонии защитная пленка переходит в рыхлый кансит (Fe_9S_8), что ускоряет коррозионные процессы.

Процессы, происходящие из-за действий сульфатредуцирующих бактерий сложны и требуют подробного изучения и уточнения, но кратко их можно описать в виде уравнений (3-5):



В процессе роста налета (био пленки) у нее появляется устойчивость к дезинфекции [3]. Такая особенность может создавать значительные проблемы в промышленном комплексе, повреждая оборудование и технологические линии. Механизм такой резистентности на сегодняшний день не получил точного объяснения, но «сложная пространственная организация био пленки и разнообразие заселяющих ее видов делают возможным выживаемость микроорганизмов в самых экстремальных условиях» [4].

Согласно данным Е.Я. Соколова («Теплофикация и тепловые сети») [5], побочным эффектом бактериологической коррозии является ухудшение органолептических показателей сетевой воды по сравнению с подпиткой: появление гнилостного запаха, изменение цвета воды до характерного рыжего и увеличение ее мутности. Причем ухудшение органолептических показателей происходит не системно, а лавинообразно, когда создаются наиболее благоприятные условия развития бактерий. К таким условиям можно отнести поступление с сетевой водой органических веществ, низкую скорость движения воды в трубопроводах и ее высокую перманганатную окисляемость.

По нашему мнению, причиной ухудшения органолептических свойств горячей воды в системе теплоснабжения города Кировска, возникшего при смене источника подпитки тепловых сетей, является бактериологическая коррозия трубопроводов. Явление бактериологической коррозии и методы борьбы с ней на текущий момент являются малоизученными. Схема водоподготовки подбирается в каждом случае индивидуально, а ее эффективность определяется в результате опыта эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ведяпина, В.О., Селезнёв В.А. О влиянии водных микроорганизмов на обработку природной воды / В.О. Ведяпина, В.А. Селезнев // Природноресурсный потенциал, экология и устойчивое развитие регионов России. Сборник статей – 2017. – с. 3-7.
2. Шарапов, В.И., Астафьев, Е.А., Суворов, А.А. Предотвращение бактериологического загрязнения трубопроводов тепловых сетей / В.И. Шарапов, Е.А. Астафьев, А.А. Суворов // Новости теплоснабжения. – 2017. - №04 (200). – с. 16-21.
3. Escalona E.S. Design of an Experimental Approach to Study the Growth of Biofilm on Polymethylmethacrylate. A Senior Project, 2013, pp.1-23.
4. Погорелова, М.А., Кузнецов, А.Л., Левачева, М.А. Электронная микроскопия био пленки, сформированной в условиях лабораторного стенда / М.А. Погорелова, А.Л. Кузнецов, М.А. Лихачева, О.А. Суворова, Л.Г. Ипатова // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2017. - №1. Т. 2. - с. 40-43
5. Соколов, Е.Я. Теплофикация и тепловые сети / Е.Я. Соколов // М: Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.

УДК 628.168.4

Я.А. Владимиров, О.В. Новикова, В.В. Сероштанов, В.В. Сучок
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОДГОТОВКИ СЕТЕВОЙ ВОДЫ В СИСТЕМЕ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ ГОРОДА КИРОВСКА

В настоящий момент город Кировск Мурманской области столкнулся с ухудшением органолептических свойств сетевой воды системы теплоснабжения: появление запаха, увеличение цветности и мутности.

В целом, согласно представленным протоколам отбора проб из тепловой сети в различных ее точках, качество горячей воды в целом соответствует нормам СанПиН

2.1.4.1074-01 [1]. Появление отклонений показателей горячей воды от нормируемых происходит эпизодически, лавинообразно, кратковременно и бессистемно.

На наш взгляд, в системе теплоснабжения имеют место последствия бактериологической коррозии трубопроводов. Процесс бактериологической коррозии протекает на стенках тепловых сетей в результате жизнедеятельности трех видов бактерий: железобактерии, тионовые бактерии, сульфатредуцирующие бактерии.

Маркерами наличия бактериологической коррозии трубопроводов являются:

1. Периодически возникающий гнилостный запах воды у потребителей;
2. Периодическое увеличение концентрации железа в воде у потребителей;
3. Ухудшение качества воды у потребителей по показателям Цветность и Мутность;
4. Наличие на внутренней поверхности тепловых сетей биопленки, которая защищает организмы от дезинфекторов и помогает выживать даже в самых экстремальных [2, 3] условиях, окрашивание пораженной поверхности в зеленый, коричневый, черный или коричнево-красный цвета, рыхлые и пористые продукты коррозии, появление на стенках трубопроводов язв (вплоть до свищей) и наростов.

Так как ряд анаэробных бактерий (в первую очередь сульфатредуцирующие) является термофильным, в качестве одного из методов борьбы с ними возможно применить испытание тепловых сетей на максимальную температуру (согласно РД 153-34.1-20.329-2001 [4]).

Согласно действующей нормативной документации [1], допускается отключение горячего водоснабжения потребителей на срок до 14 суток. В этот период предлагается осуществить промывку тепловой сети и внутренних систем отопления. Основные вредоносные анаэробные бактерии существуют в воде с pH менее 10. Соответственно, если поднять pH среды более этого значения, то бактерии погибнут. Но согласно [1] не допускается превышение pH питьевой воды более 9. Одновременно, pH промывочной воды не регламентируется. Следовательно, возможна организация промывки тепловых сетей водой с $pH \approx 10,5$. Поскольку смылке биопленки способствует повышенная скорость движения теплоносителя по трубам, необходимо обеспечить скорость движения воды по трубопроводам в интервале 1,5-2 м/с. Повышение pH воды возможно обеспечить посредством установки системы дозирования щелочного реагента (силикат натрия по ГОСТ 13078-81). Организация установки возможна в соответствии с РД 34.37.505 [3]. Данная технология разрешена к применению в открытых системах горячего водоснабжения.

Промывка трубопроводов водой с повышенным pH позволит уничтожить бактерии, чувствительные к повышению pH среды – сульфитредуцирующие, тионовые и железобактерии. Во избежание превышения pH воды у потребителя после осуществления промывки водой с повышенным pH, необходимо осуществить повторную промывку системы теплоснабжения сетевой водой.

Для поддержания требуемых параметров (мутность, запах, железо и др.) и обеззараживания воды в течение длительного времени обычно применяются следующие операции:

- 1) Повышение водородного показателя воды с помощью едкого натра (NaOH);
- 2) Повышение скорости движения воды в трубопроводах;
- 3) Кратковременного повышения содержания кислорода в воде;
- 4) Озонирование воды;
- 5) Обработка воды с помощью ультрафиолетового излучения;
- 6) Обработка воды с использованием электрического тока, в результате которого с помощью разрядов в воде образуются радикалы и ионы меди и серебра с электродов;
- 7) Реагентная обработка воды.

Применение пунктов 1-3 для системы теплоснабжения г. Кировска невозможно: водородный показатель исходной воды близок к максимально допустимому, повышение скорости движения теплоносителя сопровождается повышением затрат электроэнергии на транспорт тепла, а повышение концентрации кислорода приведет к активной коррозии трубопроводов. Озон в данное время используется в большинстве европейских стран. Этот способ очень эффективен против вирусов, способствует удалению мутности, но при этом образует большое количество побочных соединений, для которых необходимо использовать биологически активные фильтры. Также остаточный озон быстро превращается в кислород и, следовательно, будет удален в деаэраторе. Таким образом, остаточное действие озонирования сетевой воды в трубопроводах вызывает сомнение. Обработка воды с помощью УФ уже предусмотрена на станции водоочистки АО «Апатитыводоканал» и на станцию вода поступает уже обработанной УФ-излучением, однако ее использование не обеспечивает нужных параметров. Использование электрического тока в виде высокоэнергетических и низкоэнергетических установок также сопровождается необходимостью наличия квалифицированного персонала для поддержания его работы.

Для реагентной обработки воды возможно использование антибиотиков и хлорсодержащих дезинфекторов. Гипохлорит натрия уже применяется на станции очистки воды и не предоставляет необходимых параметров. Наиболее надежным, универсальным и дешевым будет использование диоксида хлора так как он среди всех хлорсодержащих дезинфекторов производит меньше всего побочных продуктов, обладает пролонгированным действием и эффективен при малых концентрациях, а ввиду того что по сравнению с требованиями [1] в воде, поступающей в тепловую сеть, содержание ионов хлора весьма низкое, использование хлорсодержащих реагентов в данной системе возможно.

В случае проведения данных мероприятий необходима только система синтеза раствора диоксида хлора (так как данное соединение наиболее эффективно сразу после получения) и его дозирования.

Исходя из всего выше сказанного для решения проблемы появления запаха, а также увеличения цветности и мутности горячей воды в точках водоразбора, для системы теплоснабжения г. Кировска наиболее эффективными будет совокупность мероприятий по улучшению органолептических свойств воды:

- 1) Испытание тепловых сетей на максимальную температуру в конце каждого отопительного периода;
- 2) Промывка трубопроводов водой с повышенным pH (около 10,5), ежегодно в ремонтный интервал (по РД 34.37.505 [5], с обработкой силикатом натрия по ГОСТ 13078-81 [6]). Принципиальная схема установки дозирования реагента приведена на Рис. 1;

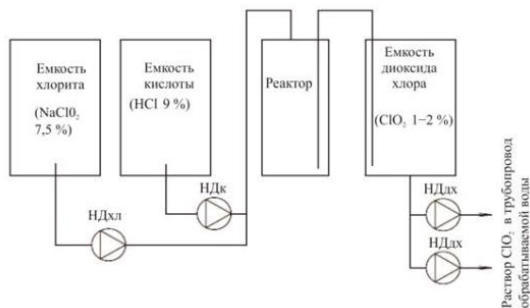


Рис 1. Схема получения диоксида хлора

3) Обработка воды диоксидом хлора [7]. Согласно свидетельству о государственной регистрации диоксида хлора как дезинфектанта №77.99.1.2.У.7184.6.05 от 28.06.2005 г., выданному Федеральной службой по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека (г. Москва), разрешено обеззараживание воды диоксидом хлора в системах хозяйственно-питьевого водоснабжения на территории России. Для г. Кировска, требуемая производительность установки – 300 м³/час по воде.

На наш взгляд, предложенные технологические мероприятия позволят решить проблему снижения органолептических свойств воды, не нарушая действующих норм и правил.

ЛИТЕРАТУРА:

1. СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения
3. Escalona E.S. Design of an Experimental Approach to Study the Growth of Biofilm on Polymethylmethacrylate. A Senior Project, 2013, pp.1-23.
4. Погорелова, М.А., Кузнецов, А.Л., Левачева, М.А. Электронная микроскопия биопленки, сформированной в условиях лабораторного стенда / М.А. Погорелов, А.Л. Кузнецов, М.А. Лихачева, О.А. Суворова, Л.Г. Ипатова // Актуальные вопросы биологической физики и химии. – 2017. - №1. Т. 2. - с. 40-43
4. РД 153-34.1-20.329-2001 «Методические указания по испытанию водяных тепловых сетей на максимальную температуру теплоносителя»
5. РД 34.37.505 «Методические указания по силикатной обработке подпиточной воды сетевого тракта на ТЭЦ»
6. ГОСТ 13078-81 Стекло натриевое жидкое. Технические условия (с Изменениями N 1, 2)
7. Инструкции по применению средства дезинфицирующего «Диоксид хлора в водном растворе» для обеззараживания воды центральных систем питьевого водоснабжения и воды плавательных бассейнов №1/16

УДК: 53.087, 536.24

Э.Р. Зайнуллина, А.Ю. Бабич, А.В. Павлов, В.Ю. Митяков
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ КОНДЕНСАЦИИ МЕТОДОМ ГРАДИЕНТНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ

Выполненные ранее эксперименты, связанные с использованием градиентной теплометрии [1] при изучении конденсации насыщенного водяного пара на внешней поверхности трубы [2, 3] подтвердили адекватность и высокую информативность нового подхода. В то же время, техника и методика эксперимента потребовала дальнейшего совершенствования. Этому и посвящена настоящая работа.

Экспериментальная установка выполнена по схеме «труба в трубе» (рисунок 1, а): внутренняя труба выполнена из нержавеющей стали 12Х18Н9Т ($d_1 = 20$ мм, $h_1 = 1300$ мм), наружная – из армированного резинового рукава ($d_2 = 65$ мм, $h_2 = 900$ мм). Труба из нержавеющей стали зафиксирована в кожухе двумя резиновыми уплотнителями.

В первой серии опытов на трубе установлены 4 ГДТП из композиции никель+сталь 12Х18Н9Т размерами $10 \times 10 \times 0,3$ мм, что позволило определить осреднённые по азимутальному углу $\varphi = 50^\circ$ местные КТО. При наклонном положении трубы распределение конденсатной плёнки по её поверхности неравномерно [4], поэтому необходимо определить плотности теплового потока и КТО по всему периметру трубы. При

модернизации установлены 5 градиентных датчиков теплового потока (ГДТП) из монокристаллического висмута (рисунок 1, б), их высокая чувствительность позволила уменьшить ширину датчиков ($3 \times 10 \times 0,3$ мм). При этом азимутальный угол снижен до 17° .

Для расчёта местных КТО необходимо знать температуру в месте установки ГДТП. Для уменьшения количества термоэлектродов применены полусферические термопары, спаи которых представляют собой контакт между медным электродом и стальной поверхностью трубы. Провода от ГДТП и термопар выведены через верхний резиновый уплотнитель (рисунок 1, в), для фиксации всех проводов в зазоре между трубой и кожухом установлены две струны (рисунок 1, г), отведённые от поверхности теплообмена.

Микровольтовый уровень сигнала ГДТП находится на уровне внешних помех аналого-цифровых преобразователей. Для качественной обработки показаний ГДТП был создан аналоговый многоканальный регистратор на базе светолучевого осциллографа Н145.

При модернизации осциллографа систему «источник света + система зеркал» заменили на лазерный модуль, а фотобумагу – на удалённую шкалу. На зеркало гальванометра направлялся лазерный луч, который отражался от зеркала гальванометра (изменявшего положение в зависимости от сигнала ГДТП) и проецировался на удалённую шкалу. Запись сигналов производилась на видеокамеру, запись обрабатывалась в программе ImageG [5] в плагине TrackMate.

По показаниям ГДТП строились зависимости плотности теплового потока от времени – временные теплограммы – свободные от шумовой составляющей (рисунок 2, а). По показаниям термопар средняя по длине трубы температура стенки составила 78°C . По результатам эксперимента рассчитан средний по длине вертикальной трубы КТО $\bar{\alpha}^{\text{эксп}} = 6,06$ кВт / ($\text{м}^2 \cdot \text{K}$), что на 0,66 % отличается от значения, полученного по формуле Нуссельта.

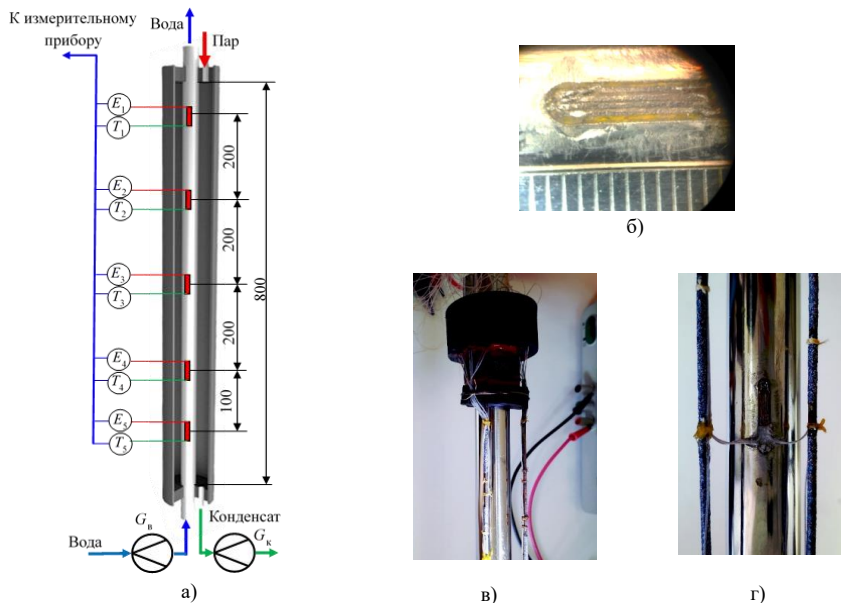


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – схема; б – монтаж ГДТП в выемке на трубе; в – верхний уплотнитель; г – струны для фиксации проводов

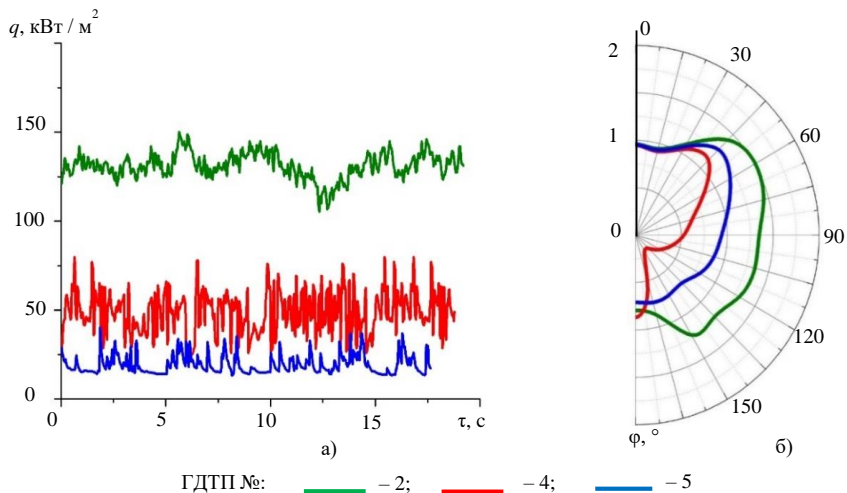


Рис. 2. Временная теплограмма (а) для вертикального положения трубы и угловая теплограмма (б) при наклоне на 80°

На рисунке 2, б в качестве примера представлена угловая теплограмма, соответствующая наклону трубы на угол $\psi = 80^\circ$. Плотность теплового потока представлена в безразмерном виде: $\tilde{q} = q(\phi)/q(0)$, где $q(\phi)$ – местная плотность теплового потока вблизи образующей с азимутальным углом ϕ ; $q(0)$ – местная плотность теплового потока вблизи верхней (лобовой) образующей с азимутальным углом $\phi = 0^\circ$.

В результате экспериментов построена зависимость среднего КТО от угла наклона трубы (рисунок 3). Наибольшее значение среднего КТО достигается при наклоне трубы на 20° и составляет $\bar{\alpha} = 6,94 \text{ кВт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К})$, превышая значение, полученное на вертикальной трубе, на 14,9%; а на горизонтальной трубе – на 25,3 %.

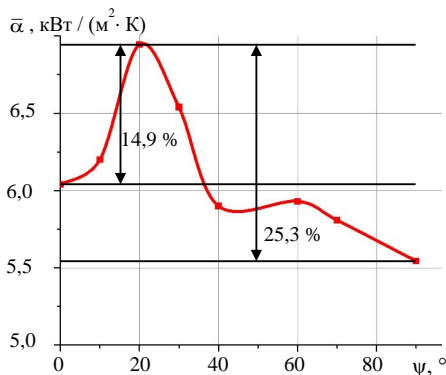


Рис. 3. Изменение среднего КТО для наклонной трубы

Модернизация экспериментального стенда и измерительных средств позволила снизить неопределённость измерения плотности теплового потока до 7,5 %, а неопределённость расчёта местного КТО – 8,4 %. Полученные результаты позволяют считать градиентную теплотрию надёжным и достоверным способом исследования теплообмена при конденсации.

Метод градиентной теплотрии позволяет построить распределения местной плотности теплового потока и местного КТО по периметру и длине трубы при любой её ориентации, от вертикальной до горизонтальной и выявить оптимальный угол наклона трубы. Применение градиентной теплотрии перспективно в прикладных задачах, связанных с созданием и совершенствованием конденсаторов различного назначения.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Сапожников С. З. Основы градиентной теплотрии / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. –215 с.
2. Зайнуллина, Э. Р. Исследование теплообмена при конденсации на внешней поверхности вертикальной трубы методом градиентной теплотрии / Э. Р. Зайнуллина, А. Ю. Бабич, А. В. Митяков // Неделя науки СПбПУ материалы научной конференции с международным участием.: сб. статей. – Санкт-Петербург, 2016. – С. 36–39.
3. Зайнуллина Э.Р. Исследование теплообмена при конденсации на поверхностях труб методом градиентной теплотрии / С. З. Сапожников, В. Ю. Митяков, А. В. Митяков, А. Ю. Бабич, Э. Р. Зайнуллина // Письма в ЖТФ. - 2019. - том 45, вып.7.
4. Брайнин, М. И. Гидродинамика ламинарного течения тонкой плёнки жидкости по наклонному цилиндру/ М. И. Брайнин, В. Н. Линецкий, А. Г. Шейнкман // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1967. – № 3. – С. 115–120.
5. Tinevez, JY.; Perry, N. & Schindelin, J. et al. (2016), "TrackMate: An open and extensible platform for single-particle tracking.", *Methods* 115: 80-90.

СЕКЦИЯ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

УДК 621.671.1

Ю.А. Антонова, А.А. Жарковский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ СПИРАЛЬНОГО ОТВОДА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО НАСОСА

Отводящие устройства лопастных насосов должны обеспечивать осесимметричный поток жидкости за рабочим колесом, создавая тем самым условия для установившегося относительного движения в области колеса, и преобразовывать кинетическую энергию потока, выходящего из колеса, в энергию давления с отводом потока к выходному патрубку таким образом, чтобы максимально снизить дальнейшие гидравлические потери в трубопроводе.

Цель работы. Разработать проточную часть насоса К65-50-160, состоящую из рабочего колеса и спиральных отводов, отличающихся друг от друга величиной площади поперечных сечений, провести гидродинамические расчеты проточных частей и сравнить их напорные и энергетические характеристики. Исходными данными для проектирования проточных частей являются: подача $Q = 25 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор $H = 32 \text{ м}$, частота вращения $n = 2900 \text{ об/мин}$.

Методы. По методике [1] были спроектированы рабочее колесо (рис.1) и спиральный отвод (рис.2), имеющий коэффициент увеличения площади поперечных сечений СО $K_S = 1,0, 0,95, 1,15 \text{ и } 1,30$. Для упрощения расчетов было выбрано прямоугольное поперечное сечение СО по рекомендациям [2].



Рис.1. Рабочее колесо насоса К65-50-160

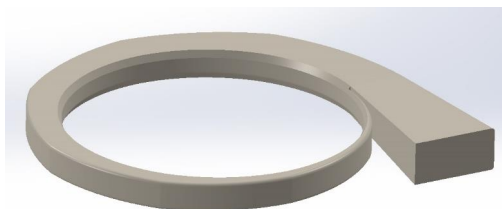


Рис.2. Спиральный отвод насоса

Далее были разработаны жидкотельные модели, имитирующие течение жидкости в проточной части, и произведен их гидродинамический расчет в стационарной постановке в программном комплексе ANSYS CFX [3]. В качестве граничных условий были заданы полное давление на входе и массовый расход на выходе из проточной части насоса. При расчетах была использована высокорейнольдсовая $k-\epsilon$ модель турбулентности.

Результаты. В результате гидродинамического расчета (рис. 3) с использованием программного комплекса ANSYS CFX были получены напорные и энергетические характеристики насосов, имеющих одинаковые рабочие колеса и разные отводы.

Было произведено сравнение результатов расчета с имеющимися экспериментальными данными для случая $K_S = 1,0$. Расчетный напор $H = 32,5$ м, экспериментальный - $H_{\text{эксп}} = 34$ м. Расчетный полный КПД насоса, рассчитанный по приближенной методике [1], $\eta = 67\%$, экспериментальный КПД - $\eta_{\text{эксп}} = 64\%$. Полученное расхождение между расчетом и экспериментом для насосов с малой быстроходностью $n_s = 65$ можно считать приемлемым.

Результаты расчета полного КПД ступеней насосов с различным расширением спирального отвода при номинальном режиме работы представлены на рис. 4. Из рассмотрения рис.4 следует, что оптимальным коэффициентом расширения отвода можно принять $K_S = 1,15$. Увеличение спирального отвода влечет за собой повышение КПД ступени на 0,6 %.

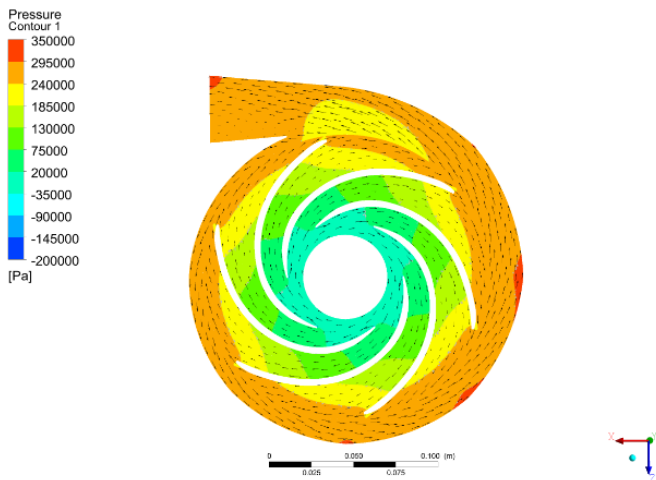


Рис.3. Поле давлений в ступени насоса K65-50-160

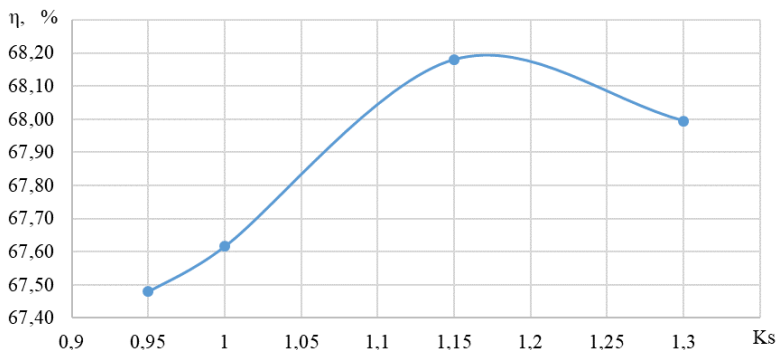


Рис.4. Влияние коэффициента K_S на гидравлические качества ступени

Выводы. По итогам проделанной работы были спроектированы проточные части ступени центробежного насоса с различными величинами поперечных сечений спирального отвода. Полученные результаты говорят о том, что вариант с увеличением площади поперечного сечения имеет лучшие энергетические характеристики в сравнении со стандартным подходом к проектированию центробежного насоса.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Горгиджаниян С.А. Гидравлические расчеты проточной части центробежных насосов. – Л.: Изд. ЛПИ, 1982. – 26 с.
2. Козлов С.Н., Петров А.И. Расчет и проектирование отводящих устройств центробежных насосов. – М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 16 с.
3. Пугачев П.В., Свобода Д.Г., Жарковский А.А. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинах с использованием пакета ANSYS CFX: учеб. пособие. – СПб.: Изд. Политехн. ун-та, 2016. – 120 с.

УДК 621.671.2

В.Э. Эюбов, И.О. Борщев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

РАЗРАБОТКА И ОПТИМИЗАЦИЯ 3D МОДЕЛИ КОНСТРУКЦИИ НАСОСА ТИПА VS4

Актуальность. В условиях развития цифровой экономики численное моделирование в инженерных задачах нашло широкое применение. Особенно актуально создание цифровых моделей и цифровых двойников узлов и деталей машин сложной геометрической формы. Важным элементом создания цифровых технологий проектирование гидромашин является численное моделирование течения вязкой жидкости в проточных частях.

Цели и задачи работы. С целью развития методик проектирования численного анализа и оптимизации насосов типа VS4 [1] выполнена разработка и 3D моделирование конструкции насоса (рис. 1). Для оптимизации конструкции необходимо выполнить ряд численных исследований влияния геометрии проточной части на характеристики насоса.

Насосы типа VS4 предназначены для перекачки углеводородов, продуктов нефтехимии и других технологических продуктов. Они применяются в нефтяной, нефтехимической и газовой промышленности.

Методы. Основные геометрические размеры вычислены по методике Ломакина А.А. [2]. В рамках численного исследования было изучено влияние на энергетические показатели насоса отношения b_3 – ширины спирального отвода на входе к b_2 – ширина рабочего колеса на выходе. Обычно для определения b_3 используют формулу $b_3 = b_2 + (0,02 \div 0,05) \cdot D_2$. Одним из этапов решаемой задачи является численное моделирование течения в проточной части. Численное моделирование течения вязкой жидкости выполнено в стационарной постановке в программном комплексе ANSYS CFX [3, 4]. Параметры насоса представлены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры насоса

Номинальная подача, Q	100 м ³ /ч
Напор при номинальной подаче, Н	33 м
Установленная номинальная мощность, N	15 кВт
Частота вращения, n	2945 об/мин
Требуемое значения КПД не менее, η	63 %

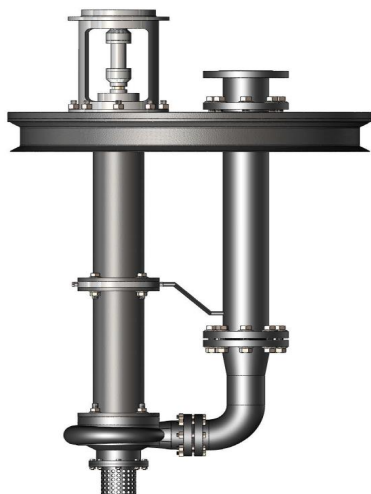


Рис. 1. Модель насоса типа VS4

Результаты. После построение жидкотельной модели (рис. 2) был проведен ряд численных исследований и выполнен анализ течения жидкости в проточной части.

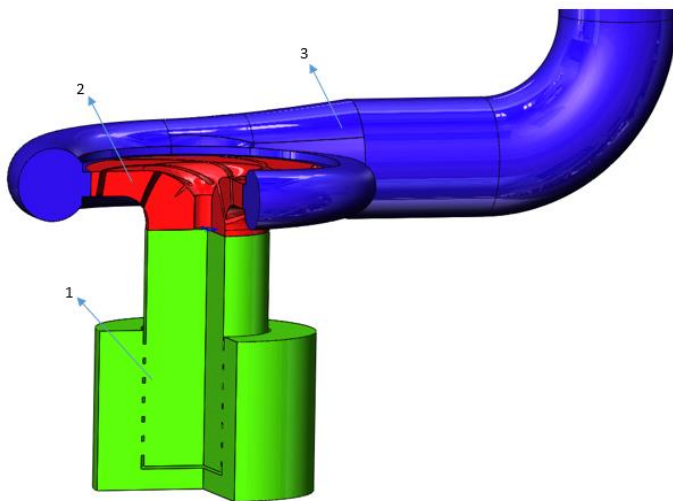


Рис. 2. Жидкотельная модель проточной части насоса VS4

В таблице 2 приведены интегральные параметры, полученные в результате гидродинамического расчета проточной части в составе: 1 - подвод, 2 - рабочее колесо, 3 - отвод.

Таблица 2. Результаты расчета

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7
b_3/b_2	1,00	1,11	1,22	1,33	1,44	1,50	1,55
Q, м3/ч	100	100	100	100	100	100	100
H, м	32,33	35,08	36,60	38,69	40,51	40,57	40,57
η_r , %	91,00	89,17	88,86	88,23	87,58	87,59	87,60
N, кВт	9,67	10,71	11,21	11,94	12,59	12,58	12,60
n, об/мин	2945	2945	2945	2945	2945	2945	2945

Из таблицы 2 следует, что отношение b_3/b_2 оказывает влияние на энергетические показатели. В частности, были взяты отношения в интервале (1,00-1,55). Видно, что при увеличении этого отношения напор (H) и мощность (N) увеличиваются, гидравлический КПД (η_r) уменьшается. Однако следует отметить, что после достижения отношения b_3/b_2 , равным значению 1,44 энергетические показатели в дальнейшем не изменяются. Оптимальным для данной конструкции является вариант отношения b_3/b_2 , равное 1,11. Так как для этого варианта обеспечен требуемый напор и гидравлический КПД достаточно высокий.

На рисунке 3 представлена зависимость энергетических показателей от b_3/b_2 .

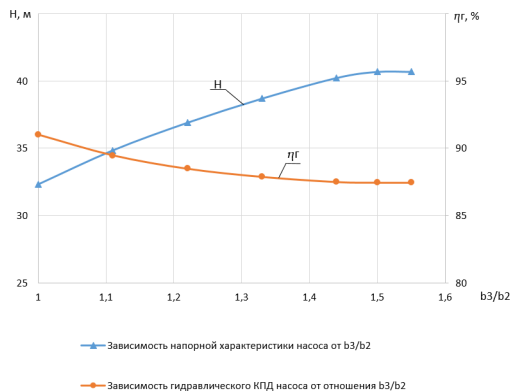


Рис. 3. Зависимость энергетических показателей от b_3/b_2

Выводы. Разработана 3D модель конструкции насоса типа VS4. С целью оптимизации данной конструкции было выполнено 7 вариантов численных исследований влияния отношения b_3/b_2 на энергетические показатели насоса VS4. В результате анализа вариантов для дальнейшей проработки и построение цифровой модели в целом можно рекомендовать отношение $b_3/b_2 = 1,11$ (вариант № 2).

ЛИТЕРАТУРА:

1. А.С. Клюев, Е.А. Иванов, И.О. Борщев - Цифровая модель фильтра насоса типа VS4
2. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. – Л.: Машиностроение, 1966. – 344 с.
3. Пугачев П.В. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинках с использованием пакета ANSYS CFX: учеб. пособие / П.В. Пугачев, Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 120 с.
4. ANSYS CFX User's Guide Release 17.1 ANSYS, Inc. 2016.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ НАСОСА ТИПА Д
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ЛП-ТАУ ПОИСКА

Актуальность. При проектировании проточной части лопастного насоса используют разные подходы – струйный [1], методы теории решеток [2], современные 3-х мерные методы [3]. В связи с тем, что входные геометрические параметры проточной части связаны между собой и корректировка одного из них приводит к изменению других, то процесс проектирования является нетривиальной задачей и требует множества последовательных приближений для обеспечения необходимого распределения локальных и интегральных параметров потока. Проблему повышения качества проточных частей можно решать с использованием различных численных методов оптимизации [4]. Оптимизационный процесс может состоять из нескольких уровней – выбор основных параметров насоса, проектирование меридианного сечения, проектирование лопастной системы. Известно достаточно много универсальных математических методов поиска оптимального решения, в том числе на основе алгоритмов инструмента оптимизации DesignXplorer, встроенного в программный комплекс Ansys Workbench. Многие из них позволяют получить более качественную конструкцию насоса без применения длительных экспериментальных исследований влияния геометрических параметров проточной части на характеристики насоса. Однако выбор наиболее быстродействующего и эффективного метода поиска экстремума (локального и глобального) целевой функции остается актуальной задачей. Обоснование используемого метода для насосов с различными быстроходностями требует сравнения гидравлических качеств проточных частей, полученных разными методами оптимизации.

Цели и задачи работы. Целью настоящей работы является решение задачи оптимизации проточной части лопастного насоса типа Д с применением метода исследования пространства варьируемых параметров (метод ЛП-тау поиска).

Объект исследования. Насос типа Д представляет собой одноступенчатый центробежный насос с рабочим колесом, имеющий двусторонний вход (рис.1).

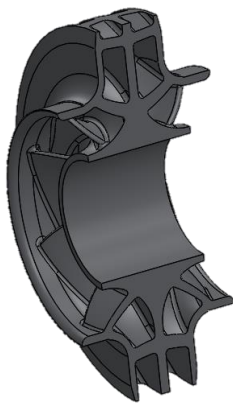


Рис.1. Рабочее колесо в разрезе

Методика исследования. Метод ЛП-тау поиска является стохастическим методом, который генерирует точки квазислучайным образом в указанном интервале входных параметров [5]. Проточная часть лопастного насоса может описываться десятками и даже сотнями входных геометрических параметров. Одновременная оптимизация всех занимает слишком много времени и поэтому является нерациональной. Таким образом, в качестве входных внутренних параметров были выбраны входные углы установки лопасти $\beta_{л1в}$ и $\beta_{л1п}$ на втулке и периферии.

Одним из основных показателей лопастного насоса является его энергоэффективность, в первую очередь, гидравлический КПД. Другие параметры насоса также могут иметь существенное значение, например, кавитационный запас или виброакустические показатели. Однако, при оптимизации проточной части по нескольким критериям часто приходится сталкиваться с ситуацией, когда они входят в противоречие друг с другом. Поэтому на первом этапе исследований была проведена однокритериальная оптимизация, где целевой функцией был задан гидравлический КПД насоса. В общем случае при выборе критериев оптимизации следует ориентироваться на техническое задание и область применения насоса данного типа.

Результаты. Задача оптимизации методом ЛП-тау решалась на основе применения современных средств вычислительной гидродинамики, путем численного расчета вязкого трехмерного течения в проточной части насоса в программном комплексе ANSYS CFX. Для достоверности полученных результатов необходимо учитывать взаимное влияние отдельных элементов проточной части друг на друга. Геометрическая модель для расчета – имитация объема, внутри которого происходит исследуемое течение, представлена на рис.2.

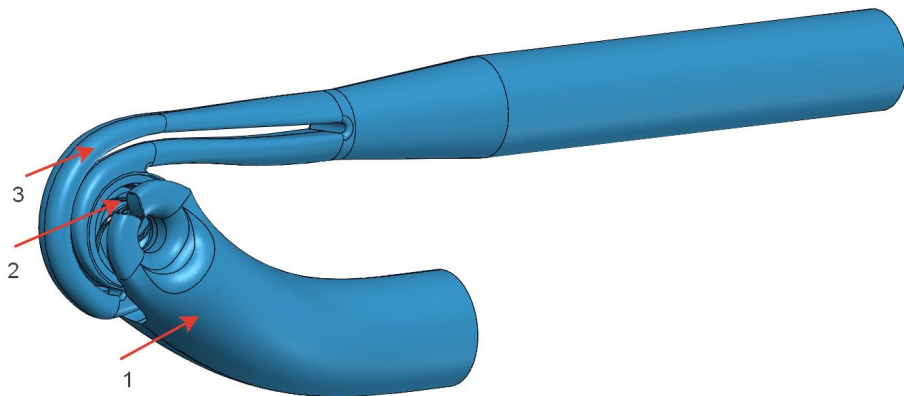


Рис.2. Проточная часть насоса типа Д

Проточная часть насоса состоит из полуспирального подвода – 1, рабочего колеса – 2, спирального отвода – 3.

Для расчета течения в проточной части генерировалась неструктурированная расчетная сетка, ячейки сетки в ядре потока представляли собой тетраэдры. Вблизи входных и выходных кромок рабочего колеса и зуба спирали производилось сгущение элементов. Вблизи твердых стенок для описания пограничного слоя были созданы слои призматических элементов.

Для сокращения времени расчетов математическая модель включала половину проточной части с заданием плоскости симметрии. Расчет течения проводился в упрощенной стационарной постановке с k-ε моделью турбулентности. В качестве граничных условий на входе задано полное давление, на выходе – половинный массовый расход, соответствующий номинальному режиму.

Для оптимизации насоса было исследовано 30 расчетных точек. В таблице 1 представлены величины варьируемых параметров, а также некоторые полученные результаты численным решением в первом приближении.

Таблица 1. Результаты численных решений методом ЛП-тау поиска

№ расчета	$\beta_{лпв}, ^\circ$	$\beta_{лпп}, ^\circ$	$\eta_r, \%$
0	40,7830	15,6640	91,35
3	38,5000	18,5000	90,96
11	37,8750	14,1250	91,81
15	36,6250	20,3750	91,64
20	44,4375	19,4375	91,87
25	40,0625	11,3125	90,83
30	41,3125	20,0625	91,06

Выводы:

1. Проведенное исследование пространства варьируемых параметром путем численных решений прямой гидродинамической задачи показало, что данный метод в первом приближении (для более точного результата необходимо считать задачу без учета симметрии потока в нестационарной постановке) позволяет повысить эффективность насоса типа Д по сравнению с исходным вариантом на 0,5% (0 – исходный, 20 – наилучший варианты). Таким образом метод ЛП-тау поиска является одним из альтернативных методов, который можно рекомендовать для оптимизации проточной части лопастного насоса.
2. Метод ЛП-тау позволяет варьировать количество расчетных точек, исходя из возможностей вычислительной мощности компьютера.
3. Метод ЛП-тау обладает простотой применения, в том числе из-за отсутствия необходимости наличия начального приближения.
4. Одним из основных преимуществ метода ЛП-тау поиска является возможность находить глобальные экстремумы целевых функций.
5. Для оценки эффективности метода ЛП-тау по сравнению с другими методами оптимизации требуется проведение дальнейших исследований.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ломакин, А.А. Центробежные и осевые насосы / А.А. Ломакин. - М.: Машиностроение, 1966. – 364 с.
2. Жарковский, А.А. Математические модели рабочих процессов лопастных гидромашин. Проектирование проточной части многоступенчатого центробежного насоса: Метод. указания / А.А. Жарковский, А.В. Грачев, С.А. Шумилин, П.В. Пугачев. - СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. – 38 с.
3. Пугачев, П.В. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинных с использованием пакета Ansys CFX: учеб. пособие / П.В. Пугачев, Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 120 с.
4. Банди, Б. Методы оптимизации / Б. Банди. - М.: Радио и связь, 1988. - 127с.
5. Соболев, И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. М.: Дрофа, Изд. 2-е перераб. и доп., 2006. – 175 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ВАЛА ГИДРОТУРБИНЫ

Актуальность работы. Валы гидротурбин предназначены для передачи крутящего момента от рабочего колеса турбины к ротору генератора. Также с помощью вала на пятю агрегата передается осевая сила. При работе вал испытывает совместное действие напряжений растяжения и кручений и, обычно, диаметр вала выбирается по номограмме, учитывающей эти напряжения. Далее проводится проверочный расчет с учетом растягивающих усилий на поперечные и крутильные колебания. Выбор диаметра вала имеет большое экономическое значение, так как стоимость вала существенно влияет на стоимость гидротурбины. Разработка методов расчета, позволяющих получить точное решение и выявить места наибольшей концентрации напряжений, является актуальной задачей.

Методика исследования. В статье рассматривается расчет вертикального вала гидротурбины двумя способами. Первый способ – определение напряжений с помощью специальной программы, которая производит расчеты по инженерным формулам [1], исходя из исходных данных модели. Вторым способом (метод конечных элементов) определяются напряжения, с помощью программного расчетного пакета пространственного моделирования. Затем проводится сравнение полученных расчетных результатов и исследуется зависимость от параметров расчетной сетки конечных элементов. Расчеты представлены на примере гидротурбины мощностью $N = 110$ МВт и диаметром рабочего колеса $D_1 = 10$ м. Начальные характеристики вала: частота вращения: $n = 57$ об/мин, максимальное осевое усилие $P = 1350$ т, крутящий момент вычисляем по формуле: $M = 97400 \text{ кг} \cdot \text{см} = 1,83 \cdot 10^7 \text{ Н} \cdot \text{м}$; внешний диаметр вала $D = 1400$ мм, внутренний диаметр вала $d = 1120$ мм. Вал будет изготовлен из стали 20ГС, вид заготовки – поковка, допускаемые напряжения $[\sigma] = 130$ МПа.

Решение с помощью программы для расчета валов гидротурбин.

Результаты исследования. Имеем специальную программу для расчета валов гидротурбин (Рис.1). Произведем с ее помощью вычисления, а затем сравним их со значениями, которые получим в расчетном программном пакете пространственного моделирования ANSYS Workbench.

Расчет вала гидротурбины	
Мощность, МВт	110
Обороты, об/мин	57
Осевая сила, кН	13239
Вес ротора, кН	600
Диаметр внешний, мм	1400
Диаметр внутренний, мм	1120
Допускаемые напряжения, МПа	130
Результаты расчета	
Момент на валу, н*м	1,88Е+07
Напряжения кручения, МПа	59,1
Напряжения растяжения, МПа	25,0
Эквивалентные напряжения, МПа	105,4
Напряжения не превышают допускаемых	
Дополнительные сведения	
Рекомендуемый диаметр вала по ОСТ	
Диаметр внешний, мм	1500
Диаметр внутренний, мм	1220

Рис.1. Программа расчета валов гидротурбины с заданными исходными данными

Согласно данной программе, расчетные напряжения в теле вала не превышают значения допустимых напряжений. Данная программа позволяет получить значения напряжений в теле вала [1].

Решение численным методом

Расчет напряженно деформированного состояния проводится расчетным пакетом пространственного моделирования ANSYS Workbench и позволит определить не только напряжения в теле вала, но и напряжения в местах концентрации.

На рис.2. приведена упрощенная 3D-модель вертикального вала гидротурбины. В местах ожидаемых концентраций напряжений расчетная сетка была загустана (рис. 3). Граничные условия приведены на рисунках 4-6.

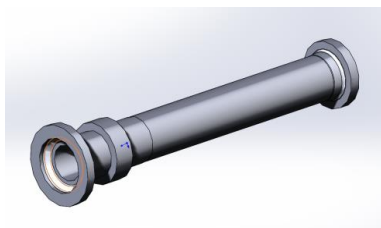


Рис.2. Упрощенная модель вала

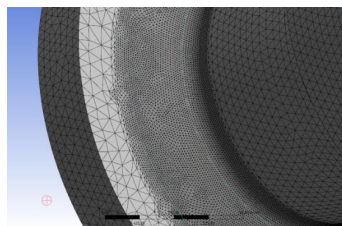


Рис.3. Расчетная сетка узлов конечных элементов

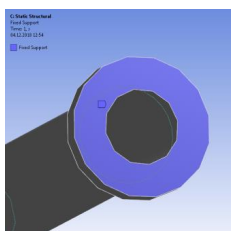


Рис.4. Граничное условие верхнего торца вала

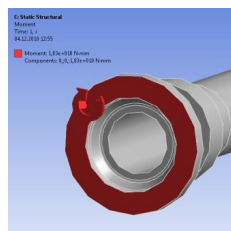


Рис.5. Граничное условие момента $M=1,83e10 \text{ N}\cdot\text{m}$

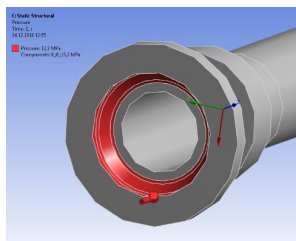


Рис.6. Граничное условие действующего давления $p=13.2 \text{ МПа}$

По итогу решения были получены планы деформаций, эквивалентных напряжений и напряжений кручения (Рис.7-9).

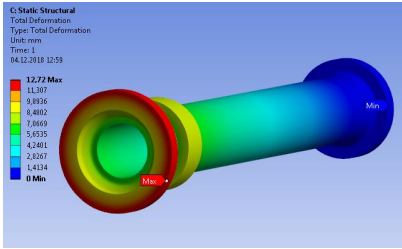


Рис.7 План деформаций вала

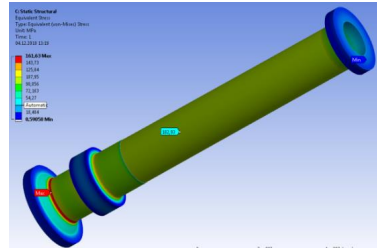


Рис.8 План эквивалентных напряжений вала

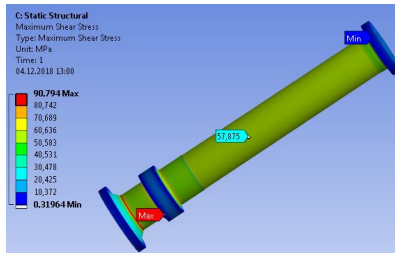


Рис.9 План напряжений кручения вала

Эквивалентные напряжения в теле вала 102.93 МПа, напряжения кручения 57,875 МПа, что равно значениям, полученным в первой программе [3] и не превышают допустимых значений. Из рисунков 5 и 6 видно, что максимальные эквивалентные напряжения и максимальные напряжения кручения превышают напряжения в теле вала. Таким образом, заданная расчетная сетка позволила выявить зоны концентрации напряжений.

В зоне концентрации напряжений максимальное напряжение $\sigma_{max}=164$ МПа, а так как для эксплуатационных режимов допускаемые местные напряжения с учетом концентрации определяются по формуле $[\sigma] = 0.75 \cdot \sigma_{0,2} = 255 \text{ МПа} \cdot 0.75 = 191.25$ МПа. Отсюда следует, что напряжения с учетом концентрации не превышают допустимые и деталь удовлетворяет условиям надежности [4].

Выводы:

В данной статье решалась задача по расчету вертикального вала гидротурбины. Решение производилось двумя способами: расчет с помощью специализированной программы по расчету валов гидротурбин и расчет методом конечных элементов в программном пакете ANSYS Workbench. Затем, два результата сравнивались между собой. Показано, что расчет эквивалентных напряжений и напряжений кручения в теле вала хорошо прогнозируется по инженерным формулам. Однако эта методика не позволяет выявить места концентрации напряжений и оценить их численные значения. Для более точного расчета необходимо применять трехмерные расчеты в программном комплексе ANSYS Workbench.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Н. Н. Ковалев. Гидротурбины. Конструкция и вопросы проектирования. – Уч.-изд. л. 46,3.- Л:“Машиностроение”, 1970. – 578 с.
2. Р. Петерсон. Коэффициенты концентрации напряжений. «Мир» 1977г – 301с.
3. ANSYS Workbench-Simulation Introduction 11.0 second Edition, ANSYS Inc., 2007.
4. Методические указания. Нормы допускаемых напряжений в основных деталях вертикальных гидравлических турбин. РД 108.023.115-87. Технический редактор А.Н. Крупнева. НПО ЦКТИ 1988.

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КЛИНОВОЙ ЗАДВИЖКИ

Актуальность. В условиях цифровой трансформации экономики численное моделирование при решении сложных инженерных задач находит все большее применение. Для исследования влияния трубопроводной арматуры на гидравлическую систему и для определения ее характеристик необходимо выполнить серию длительных экспериментальных исследований на специализированных стендах. Применение численных методов «цифровой проливки» позволит сократить временные и финансовые затраты на такие работы.

Цели и задачи работы. Цель работы: создание методики «цифровой проливки» задвижки. Задача: разработать цифровую модель клиновой задвижки с номинальным диаметром $DN = 80$ мм, имеющейся на кафедре гидромашиностроения, и численными методами определить ее характеристики в соответствии с ГОСТ 34437-2018 [1].

Методы. Для проведения гидродинамического расчета запорной арматуры выбран гидродинамический пакет программ ANSYS CFX [2, 3], который хорошо себя зарекомендовал в практике гидромашиностроения. Трехмерный расчет проводился в стационарной постановке, модель турбулентности $k - \epsilon$. Граничные условия: на входе в расчетную область - полное давление, а на выходе - массовый расход.

Результаты. Построена трехмерная модель клиновой задвижки (рис. 1) [4].

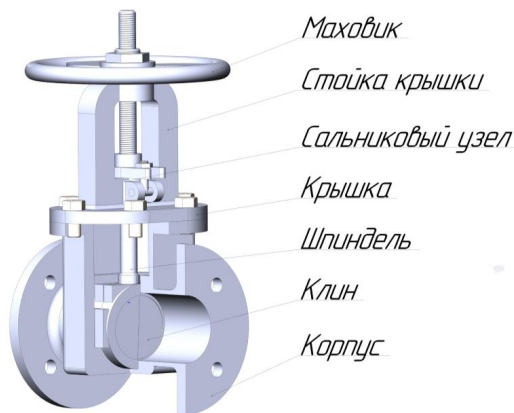


Рис. 1. Основные элементы клиновой задвижки

Задвижки такого типа находят широкое применение в нефтяной, газовой и атомной промышленности. Также они используются на химических предприятиях, имеющих технологические линии по перекачиванию агрессивных растворов. Характеристики задвижек используются для построения схем гидравлических сетей и необходимы для правильного подбора трубопроводной арматуры на заданные параметры.

Схема «виртуального» стенда для «цифровой проливки» гидравлических задвижек представлена на рис. 2.

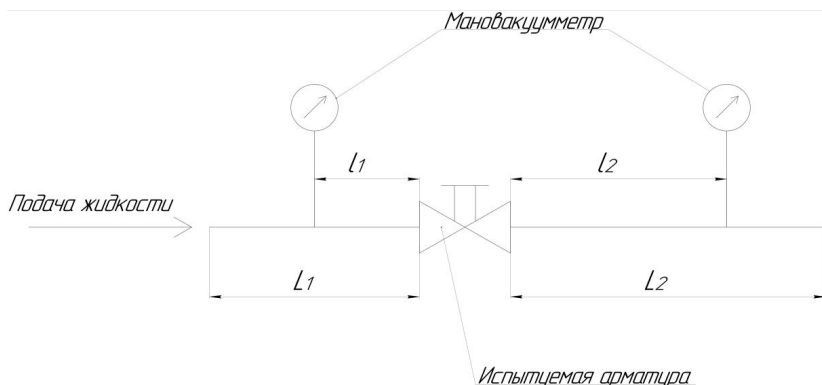


Рис. 2. Схема «виртуального» стенда для «цифровой проливки» гидравлических задвижек
 l_1 – длина прямого участка трубы от входного патрубка испытуемой арматуры до точки отбора давления, м; l_2 – длина прямого участка трубы от выходного патрубка испытуемой арматуры до точки отбора давления, м; L_1 – длина прямого участка трубопровода до испытуемой арматуры, м; L_2 – длина прямого участка трубопровода после испытуемой арматуры, м.

Параметры «виртуального» стенда приняты в соответствии с требованиями ГОСТ 34437-2018 «Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик» [1].

Выполнена серия гидродинамических расчетов течения вязкой жидкости в задвижке на различных режимах (при скорости потока жидкости до испытуемой арматуры $v_1 = 1 \text{ м/с}; 2 \text{ м/с}; 3 \text{ м/с}$). В результате гидродинамического расчета получены потери напора (Δh) на задвижке. По формуле (1) вычислены коэффициенты сопротивления задвижки (ζ) при разных текущих ходах задвижки (h_i).

$$\zeta = \frac{2 \cdot g \cdot \Delta h}{v_1^2}, \quad (1)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения.

Результаты расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты гидродинамического расчета

Текущий ход задвижки, %	$v_{cp} = 1 \text{ м/с}$		$v_{cp} = 2 \text{ м/с}$		$v_{cp} = 3 \text{ м/с}$	
	$\Delta h, \text{ м}$	ζ	$\Delta h, \text{ м}$	ζ	$\Delta h, \text{ м}$	ζ
25,0	1,7450	34,237	7,0250	34,458	15,810	34,466
50,0	0,2540	4,983	1,0220	5,013	2,2300	4,891
75,0	0,0340	0,667	0,1345	0,660	0,3027	0,660
100,0	0,0184	0,360	0,0727	0,357	0,1645	0,359

Отличия расчетных коэффициентов сопротивления не превышают 2,5 %.

В литературе [4] приводятся фактические значения коэффициента сопротивления ζ на полном открытии. Для клиновой задвижки с номинальным диаметром $DN = 80 \text{ мм}$

коэффициент сопротивления находится в диапазоне $(0,3 + 0,6)$. Полученное цифровым моделированием значение ζ входит в данный диапазон.

Расчетный график зависимости коэффициента сопротивления задвижки от ее текущего хода представлен на рис.3.

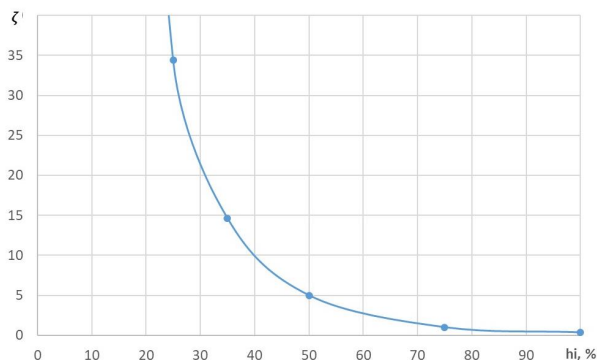


Рис. 3 Зависимость коэффициента сопротивления задвижки от ее текущего хода

Выводы. В результате выполненной работы была разработана цифровая модель клиновой задвижки. Выполнены гидродинамические расчеты на различных режимах течения жидкости, в ходе которых была получена зависимость коэффициента сопротивления от текущего хода задвижки. Цифровая модель «проливки задвижки» будет использована для реализации комплексного проекта лаборатории гидромашиностроения «Цифровое моделирование сценариев работы насосов на гидравлическую сеть». В дальнейшем планируется испытать данную задвижку для проверки полученных результатов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. ГОСТ 34437-2018 «Арматура трубопроводная. Методика экспериментального определения гидравлических и кавитационных характеристик».
2. Пугачев П.В. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинках с использованием пакета ANSYS CFX: учеб. пособие / П.В. Пугачев, Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 120 с.
3. ANSYS CFX User's Guide Release 17.1 ANSYS, Inc. 2016.
4. Гуревич Д.Ф. Расчет и конструирование трубопроводной арматуры: Расчет трубопроводной арматуры. Изд. 5-е. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 480 с.

УДК 621.65.03

О.А. Иванов, А.А. Жарковский
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДИСКОВОГО РАБОЧЕГО КОЛЕСА В ПОГРУЖНОМ НЕФТЯНОМ НАСОСЕ

Актуальность. На сегодняшний день в сфере нефтедобывающей промышленности наиболее широкое распространение получили погружные электронасосы, имеющие в своей конструкции центробежные рабочие колеса [1]. Недостатки таких насосов: ступени

нефтяные с низкой расходностью $Q = (5 + 50) \text{ м}^3/\text{сутки}$ имеют сравнительно низкий напор и КПД; форма характеристики часто имеет «западающий» характер. Как известно, дисковые насосы [2], являющиеся насосами трения, хорошо зарекомендовали себя в области перекачивания высоковязких жидкостей, содержащих большое количество включений. Поэтому существует необходимость исследования возможности использования дискового рабочего колеса в погружном нефтяном насосе.

Цели и задачи работы. Была поставлена задача исследовать возможность применения дискового рабочего колеса в погружном нефтяном насосе. Для этого требуется создать дисковое рабочее колесо, имеющее следующие ограничения: максимально возможный наружный диаметр диска $D_2^{max} = 71,5 \text{ мм}$, частота вращения $n = 2910 \text{ об/мин}$. Необходимо выполнить гидродинамический расчет рабочего колеса в широком диапазоне расходов $Q = 5 + 50 \text{ м}^3/\text{сутки}$, изменяя расстояние между дисками (b_1).

Методы. Для выполнения гидродинамического расчета был принят гидродинамический пакет программ ANSYS CFX [3, 4]. С целью экономии вычислительных ресурсов расчет проводился в стационарной постановке. Была принята $k - \epsilon$ модель турбулентности. При использовании этой модели система уравнений движения дополняется двумя уравнениями, описывающими перенос кинетической энергии турбулентности (k) и скорости диссипации (ϵ). Граничные условия: на входе в расчетную область - полное давление, на выходе - массовый расход жидкости. Рабочая жидкость - вода.

Результаты. Было выполнено построение модели дискового рабочего колеса (рис.1).

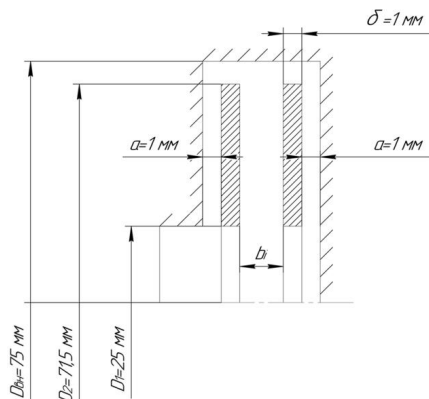
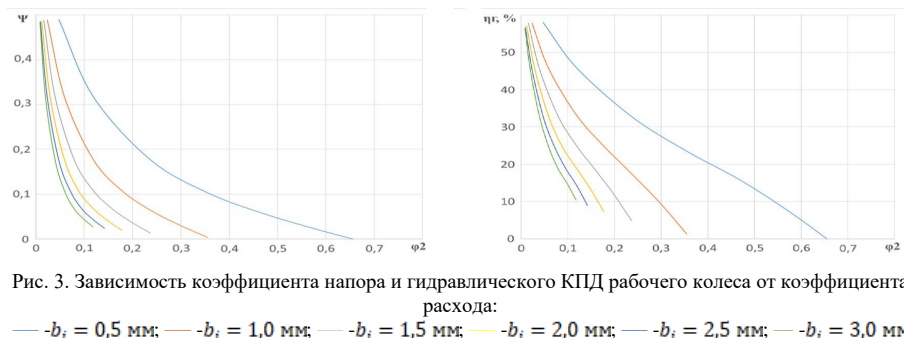
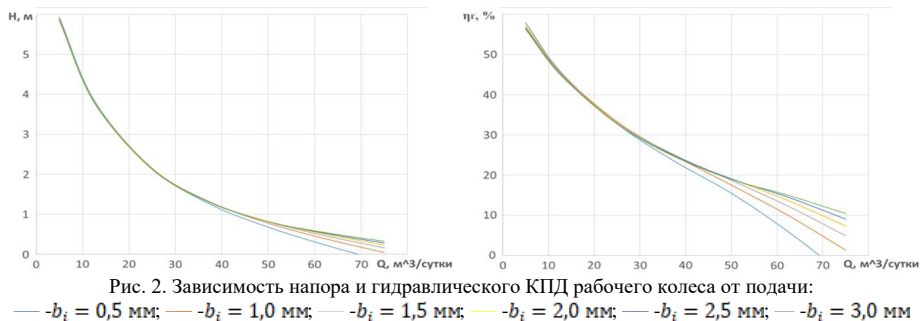


Рис. 1. Схема дискового рабочего колеса

Ступень насоса состоит из двух дисков толщиной $\delta = 1 \text{ мм}$, установленных в корпус, внутренний диаметр которого составляет $D_{вн} = 75 \text{ мм}$. Расстояние между боковыми поверхностями дисков и корпусом составляет $a = 1 \text{ мм}$. Внутренний диаметр дисков $D_1 = 25 \text{ мм}$, наружный диаметр дисков $D_2 = 71,5 \text{ мм}$.

Выполнен гидродинамический расчет течения вязкой жидкости в диапазоне расходов $Q = (5 + 50) \text{ м}^3/\text{сутки}$. Произведено исследование влияния величины зазора между дисками на характеристики рабочего колеса.

По результатам расчетов построены зависимости напора H и гидравлического КПД от подачи Q (рис. 2) и зависимости коэффициента напора Ψ и гидравлического КПД от коэффициента расхода φ_2 (рис. 3) для разных расстояний между дисками b_1 .



Выводы. Исследована работа дискового рабочего колеса в широком диапазоне расходов $Q = (5 \div 50) \text{ м}^3/\text{сутки}$. Расстояние между дисками изменялось в пределах $b_i = (0,5 \div 3,0) \text{ мм}$. Результаты расчета показали возможность применения дискового рабочего колеса в погружном нефтяном насосе при подачах до $(20 \div 25) \text{ м}^3/\text{сутки}$. При таких подачах напор и гидравлический КПД ступени с дисковым колесом выше, чем у аналогичной ступени нефтяного погружного насоса с центробежным рабочим колесом. Можно отметить, что на низких подачах до $35 \text{ м}^3/\text{сутки}$ изменение расстояния между дисками в пределах $b_i = (0,5 \div 3,0) \text{ мм}$ практически не сказывается на величине напора и КПД. Заметное влияние расстояние между дисками оказывает на параметры насоса при расходах более $35 \text{ м}^3/\text{сутки}$, где использование данного насоса становится нерациональным. Форма напорной характеристики ступени с исследованным дисковым колесом имеет непрерывно падающий характер в отличие от ступени насоса с центробежным рабочим колесом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Богданов А.А. Погружные центробежные электронасосы для добычи нефти (расчет и конструкция). Изд-во «Недра», 1968 г. – 272 с.
2. Мисюра В.И., Овсянников Б.В., Присяжков В.Ф. Дисковые насосы. – М.: Машиностроение, 1986. – 112 с.
3. Пугачев П.В. Расчет и проектирование лопастных гидромашин. Расчет вязкого течения в лопастных гидромашинках с использованием пакета ANSYS CFX: учеб. пособие / П.В. Пугачев, Д.Г. Свобода, А.А. Жарковский. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – 120 с.
4. ANSYS CFX User's Guide Release 17.1 ANSYS, Inc. 2016.

СОЗДАНИЕ ПРОТОТИПА РАБОЧЕГО КОЛЕСА ОСЕВОГО НАСОСА, СОВМЕЩЕННОГО
С ЯКОРЕМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО НАПЛАВЛЕНИЯ

Актуальность. Современные аддитивные технологии постепенно в той или иной мере вытесняют из некоторых сфер производства традиционную механическую обработку. Все больше отечественных и зарубежных производств используют 3D печать на этапе прототипирования будущего продукта, а так же на разных этапах его производства, например: при изготовлении оснастки для объемной штамповки, мастер-моделей для литья и т.д. Тем не менее, производство конечного продукта как итога аддитивных технологий развито еще не так сильно, ввиду некоторых недостатков, а именно: сложность в изготовлении больших партий изделий, невысокие параметры прочности у дешевых материалов и высокая стоимость у прочных, возможность работать только с сильно ограниченным набором материалов. По результатам проведенных исследований предлагается использовать метод послойного наплавления композитного материала – стеклонаполненного полиамида для изготовления насоса с совмещенным с рабочим колесом, во внешнем кольце которого располагается якорь электродвигателя (рис. 1). Данный метод применительно к телам сложной конфигурации дает существенную экономию при производстве единичных и мелкосерийных партий.

Метод исследования. Научная новизна метода состоит в способе изготовления ротора, при котором в процессе печати рабочего колеса программно предусматриваются паузы, во время которых оператор заполняет специальные полости магнитами постоянного поля. Таким образом, по завершении печати рабочее колесо оказывается с замкнутым внутренним контуром, в который заключен якорь электродвигателя.

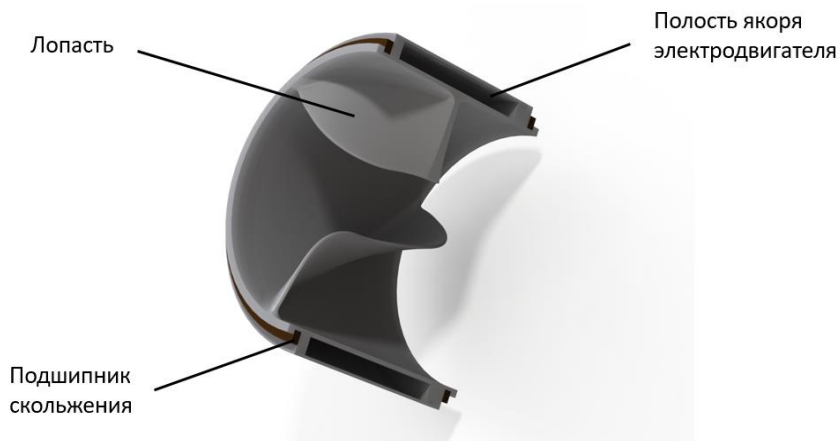


Рис. 1. Ротор рабочего колеса в разрезе.

Результаты исследования. Предложенная компоновка позволяет избежать сложной конфигурации вала и отвода, упростить их изготовление и монтировать насос сразу в прямой трубопровод [1].

Существенный выигрыш в массогабаритных характеристиках насоса ввиду отсутствия необходимости вышеперечисленных компонентов позволит использовать его на транспортных средствах в качестве движительной установки, в местах, где требуется установка «по месту» ввиду упрощенного монтажа, в качестве мобильного артериального насоса и т.д. Так же данный метод позволяет упростить дальнейшую сборку и эксплуатацию изделия, гарантирует изоляцию якоря от воздействия перекачиваемой жидкости, повышает прочностные характеристики элемента.

Рабочее колесо планируется изготавливать из высокопрочного теплостойкого стеклонаполненного полиамида марки PA-46. Конструкционные термопласты получили широкое распространение ввиду их уникальных свойств, основным из которых является возможность использовать их для 3D печати [2]. К общим чертам филаментов на основе полиамида относятся химическая инертность, антифрикционные свойства и повышенная прочность. Так, значение модуля упругости полиамида 46 (PA 46), 30% стеклонаполненного, может достигать до 9 ГПа, что превышает модули упругости многих филаментов в несколько раз. Полиамид-46 более гибок и упруг, по сравнению с PA6 и PA66. Рабочая температура — около 100 °С, отдельные модификации — до 120. Также, у данных материалов сравнительно небольшое значение объемной усадки, в связи с чем отпадает необходимость использовать станок с термокамерой. К возможным проблемам при работе с данным композитом можно отнести то, что его высокая твердость негативно сказывается на толкающих филамент шестернях, в связи с чем часто возникает необходимость использовать шнековый экструдер.

Также проведены исследования привода насоса. Как известно, для работы любого электродвигателя необходимо наличие электромагнитного поля, способного взаимодействовать с током ротора или якоря для создания электромагнитного момента. И, по сути, получается, что цепь возбуждения абсолютно любой электрической машины — это магнит, источник магнитного поля. Поэтому совершенно логична замена этой цепи на обывоченные постоянные магниты.

Для двигателей постоянного тока и для синхронных электрических машин идея использования постоянных магнитов в цепи возбуждения довольно реализуема. Преимущества в замене таковы: во-первых, привычная обмотка возбуждения на электромагнитах является пусть и совсем небольшим, а все же потребителем активной электроэнергии. Поэтому постоянные магниты в цепи возбуждения позволяют повысить энергетические показатели и, в частности, КПД. Во-вторых, постоянные магниты упрощают конструкцию цепи возбуждения, повышают надежность электродвигателя в целом. В особенности это касается синхронных двигателей, система возбуждения которых конструктивно находится в составе ротора.

В классическом варианте с использованием электромагнитов в конструкции синхронной машины включаются токосъемные кольца и щетки для питания обмотки возбуждения постоянным током. Но этот токосъемный узел серьезно снижает надежность двигателя и сокращает наработку на отказ. В то же время, постоянные магниты не нуждаются в электрическом питании, поэтому при их использовании отсутствует необходимость в токосъемном узле для ротора. На рис. 2 изображена угловая характеристика синхронной машины.

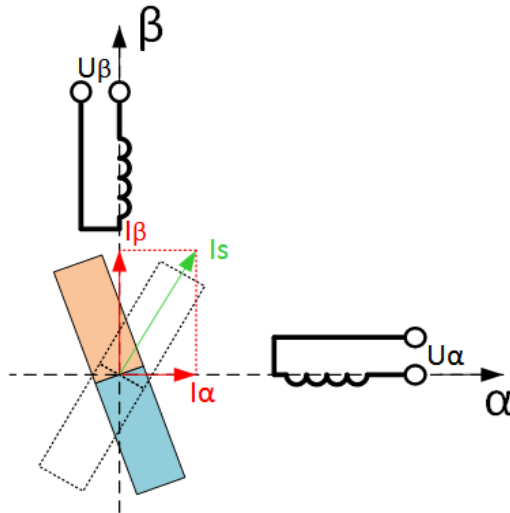


Рис. 2. Угловая характеристика синхронной машины.

Из характеристики, представленной на рис 2 следует, что двигатель развивает наибольший момент, когда ротор находится под 90° к вектору тока. Так как при дальнейшем создании системы управления на микроконтроллере нужно получить от двигателя наибольший момент при минимуме потерь (а потери, в первую очередь, это ток в обмотках), то рациональнее всего ставить вектор тока всегда под 90° к магнитному полю ротора, т.е. перпендикулярно магниту на рис. 2. Регулирование момента двигателя будет осуществляться амплитудой тока.

В качестве схемы управления электродвигателем планируется использовать замкнутое по току векторное управление, при котором задание тока – некая константа, тот ток, который необходимо поддерживать для этой фазы. Задание поступает на сумматор регулятора тока, который, в свою очередь на выходе задает напряжение фазы U_α , рассчитывающий в дальнейшем задания скважностей для таймеров ШИМ микроконтроллера [3].

Выводы. Для изготовления моделей рабочих колес насосов предложен метод послойного наплавления композитного материала. В качестве материала рекомендуется использовать теплостойкий полиамид марки PA-46. Данный метод позволит не только значительно упростить и удешевить производство, но и создавать детали и механизмы, производство которых ранее было невозможно.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Вершинин И.М. Влияние конструктивных и рабочих параметров лопастных гидромашин на критерий динамического подобия // Изв.вузов СССР: Энергетика. -1984.- №7, С.П6-121.
2. Jia Y. et al. Preparation of a new filament based on polyamide-6 for three-dimensional printing // Polymer Engineering & Science. – 2017. – V. 57. – N. 12. – P. 1322-1328.
3. Анучин А. С. Системы управления электроприводов. МЭИ, 2015

ВЕРИФИКАЦИЯ МЕТОДИКИ ЧИСЛЕННОГО РАСЧЁТА СТРУЙНОГО НАСОСА

Актуальность. Моделирование физических процессов течения вязкой жидкости требует учитывать влияние большого числа параметров. К таким параметрам относятся: тип расчётной сетки (структурированная или неструктурированная), число элементов расчетной области, соответствие этих элементов параметрам качества, тип граничных условий и т. д. [1]. Поскольку к настоящему времени недостаточно отработаны модели, которые позволяют учесть отклонения результатов численного расчета, перед исследованием каждого конкретного случая следует провести ряд предварительных расчетов, которые позволят удостовериться в адекватности применяемой модели.

Цели и задачи работы. Целью работы является разработка цифровой модели течения жидкости в проточной части струйного насоса, а также верификация этой модели путем сравнения результатов расчёта с экспериментальными данными.

Результаты. Верификация численного моделирования струйного насоса была проведена с использованием экспериментальных данных полученных в Лаборатории гидромашиностроения СПбПУ при испытаниях струйного насоса. Схема исследуемого аппарата представлена на рис.1.

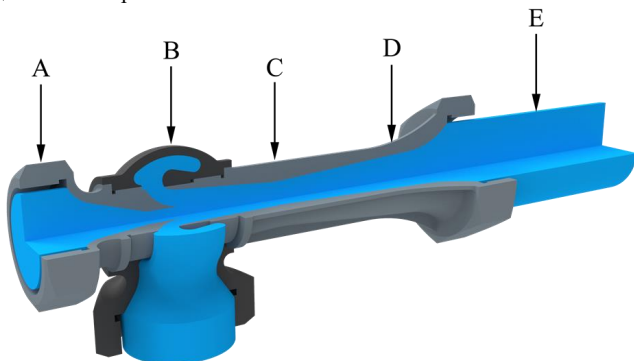


Рис. 1. Схема струйного насоса: *A* – рабочее сопло; *B* – приёмная камера; *C* – камера смешения; *D* – диффузор; *E* – расчётный объём жидкости

Основной принцип работы струйного насоса заключается в передаче кинетической энергии одного потока жидкости (рабочего) другому (инжектируемому) путём непосредственного контакта (смешения) [2]. Потoki рабочей и инжектируемой сред поступают в камеру смешения, где происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся повышением давления. Из камеры смешения поток поступает в диффузор, где происходит дальнейший рост давления [3].

Для исключения влияния размерности расчетной сетки на решение задачи было проведено исследование на сеточную сходимость. Построение расчетной сетки было выполнено в программном модуле ANSYS Meshing. Расчетная сетка – неструктурированная, тип элементов – тетраэдры, на стенках сгенерированы призматические слои для обеспечения требований *k-ε* модели турбулентности.

Расчет выполнялся в CFD пакетах ANSYS CFX и ANSYS Fluent [4]. Тип расчета – стационарный, рабочая среда – вода при $T = 20$ °C, модель турбулентности – *k-epsilon*, тип граничных условий (ГУ) приведен в таблице 1.

Таблица 1. Граничные условия

Граница	Тип граничного условия	Условное обозначение
Вход рабочей жидкости	Total Pressure	P_p
Вход инжектируемой жидкости	Total Pressure	P_u
Выход смешанного потока	Static Pressure	P_c

Перепад давления был выбран в качестве ГУ, поскольку от данного струйного насоса требуется обеспечение определенного расхода смешанной среды при заданном противодавлении. На рисунке 2 представлена зависимость массового расхода смешанной среды на выходе из насоса G_c от количества элементов расчетной сетки, откуда видно, что сгущение сетки свыше 4,6 млн ячеек не приведет к значительному повышению точности расчёта.

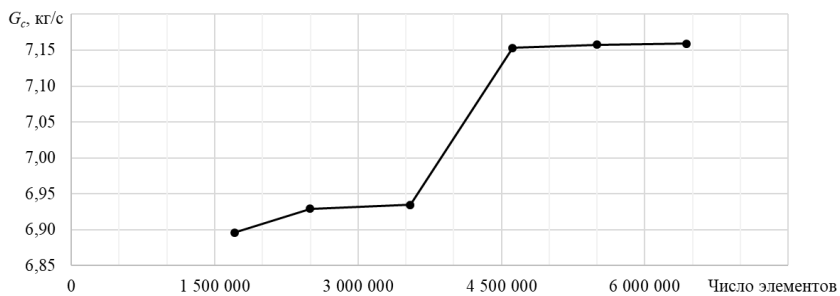


Рис. 2. Исследование сеточной сходимости

Верификационный численный расчёт характеристики струйного насоса был проведен при различных давлениях, значения которых представлены в таблице 2.

Таблица 2. Граничные условия для выполнения расчета

№	P_p , Па	P_u , Па	P_c , Па
1	787 557	-19 083	140 742
2	689 538	-16 851	121 181
3	591 502	-15 145	103 576
4	493 558	-13 821	89 883
5	395 528	-11 434	70 322
6	297 488	-9 964	52 717

В таблице 3 представлены значения массового расхода рабочей жидкости G_p , полученные в результате эксперимента, расчётов в пакетах ANSYS Fluent и ANSYS CFX, а также отличия в результатах. Аналогичные данные приведены и для массового расхода смешанной среды G_c . На рис. 3 и 4 представлены графики зависимости массовых расходов рабочей и инжектируемой сред от напора рабочей жидкости.

Таблица 3. Результаты расчёта характеристики струйного насоса

№	G_p Экс.	G_p Fluent	δ_p Fluent	G_p CFX	δ_p CFX	G_c Экс.	G_c Fluent	δ_c Fluent	G_c CFX	δ_c CFX
	кг/с	кг/с	%	кг/с	%	кг/с	кг/с	%	кг/с	%
1	3,589	3,727	3,83	3,779	5,29	7,198	6,929	-3,74	6,885	-4,35
2	3,350	3,487	4,09	3,535	5,53	6,780	6,531	-3,66	6,429	-5,18
3	3,091	3,230	4,51	3,275	5,95	6,281	6,057	-3,56	5,956	-5,18
4	2,911	2,949	1,28	2,992	2,77	5,832	5,424	-7,00	5,363	-8,05
5	2,592	2,640	1,85	2,679	3,34	4,835	4,912	1,59	4,832	-0,08
6	2,223	2,291	3,05	2,326	4,62	4,187	4,240	1,26	4,198	0,25

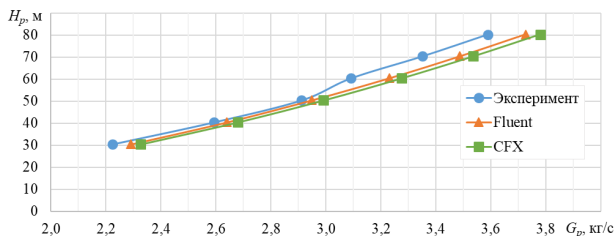


Рис. 3. Зависимость рабочего напора H_p от расхода рабочей жидкости G_p

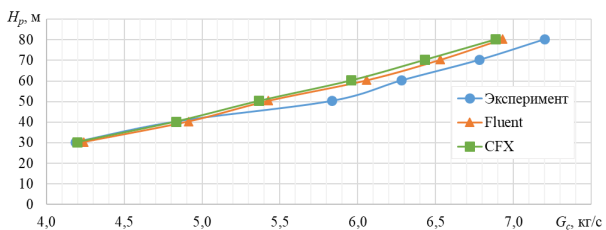


Рис. 4. Зависимость рабочего напора H_p от расхода смешанного потока G_c

Выводы. Проведенное исследование показало, что результаты численного расчёта струйного насоса сходятся с экспериментальными значениями с погрешностью не более 5%. Следовательно, разработанная цифровая модель является корректной и её применение позволяет с высокой точностью проводить цифровое моделирование и прогнозировать энергетические характеристики струйных насосов на заданные параметры.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Веретенников С.В., Баринов С.Н. Влияние параметров сетки на результаты численного моделирования // Прикладная математика, механика и процессы управления: материалы I Всерос. науч.-техн. интернет-конф. молодых ученых, Пермь, 14–19 ноября 2013 г. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. унта, 2014. – С. 140–149.
2. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 352 с.
3. Подвидз Л.Г. Расчет оптимального струйного насоса для работы на разнородных и однородных жидкостях / Л.Г. Подвидз, Ю.Л. Кирилловский // Труды ВНИИГидро-маша. – Москва, 1963. – Вып. 33. – С. 114-129.
4. Aldas, K. Investigation of Effects of Scale and Surface Roughness on Efficiency of Water Jet Pumps Using CFD / K. Aldas, R. Yapici // Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics. - 2014. - Vol. 8. – No. 1. – P. 14–25. DOI: 10.1080/19942060.2014.11015494

РАСЧЕТ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ В ЭЛЕМЕНТАХ СЕТИ ВОДОСНАБЖЕНИЯ
ЭМПИРИЧЕСКИМ И ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДАМИ

Актуальность. Реконструкция сетей водоснабжения ГУП «Водоканал Санкт-Петербург» требует использования современных технологий и создания цифровых моделей участков сетей. Цифровые двойники удобно использовать для рассмотрения гидравлической характеристики сети и ее эксплуатационных свойств, а также для подбора оптимальных конфигураций оборудования на стадии проектирования. Для моделирования потерь на участке сети требуется расчет гидравлических потерь в его элементах во всем диапазоне расходов. Цифровое моделирование дает возможность создания методики, позволяющей при наличии входных данных – расходов и давления на насосной станции – определить потери на всем участке сети и давление на выходе. Проведение расчета гидравлических сопротивлений возможно различными методами: эмпирическим методом с помощью справочных материалов и численным методом с использованием компьютерного моделирования.

Цели и задачи. Целью работы является создание методики расчетов гидравлических потерь на участке сети. Задача расчетных исследований – сравнение результатов, полученных эмпирическим методом с помощью справочного пособия по расчету гидравлических сопротивлений [1] и методом компьютерного моделирования с применением инструмента вычислительной гидродинамики ANSYS CFX [2]. Для создания методики разработки цифрового двойника участка водопроводной сети расчеты необходимо выполнить для элементов гидравлической сети и арматуры во всем диапазоне возможных расходов.

Результаты. На основе данных, предоставленных ГУП «Водоканал Санкт-Петербург», проведен анализ принципов работы и регулирования повысительной насосной станции №14 с установленным насосным оборудованием и арматурой и прилегающего к ней участка сети водоснабжения [3, 4].

Компьютерное моделирование в ANSYS CFX проведено при максимальном выходном давлении повысительной насосной станции, равном 6 нормальным атмосферам, в качестве входного граничного условия и при проектном массовом расходе потребления на участке сети в качестве выходного граничного условия. Использована модель турбулентности $k-\epsilon$ с масштабируемой настенной функцией. Также для расчетов задана шероховатость стенок равная 1 мм, характерная для корродированных чугунных труб систем водоснабжения, обтекание стенок без проскальзывания. Температура рабочей среды назначена 10°C в соответствии с санитарными нормами. Геометрические модели элементов строились согласно ГОСТам и каталогам производителей арматуры. Толщина первого элемента генерируемой сетки от стенки определяется для отдельного каждого расчета по формуле $\Delta = d \cdot y^+ \cdot \sqrt{74 \cdot Re^{-13/14}}$, где d – диаметр трубопровода, безразмерный параметр y^+ задается равным 30.

Для оценки причин возникновения гидравлических потерь в рассматриваемых элементах сети на первом этапе проведено сравнение методов на режиме, соответствующем среднечасовому расходу насосной станции. Результаты выполненного расчета гидравлических потерь для различных типов элементов при проектном расходе 17 м³/ч и проходными сечениями трубопроводов диаметром 150 мм приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты расчетов гидравлических потерь в элементах сети

Тип элементов гидравлической сети	Потери Δp , Па, по методу:			
	эмпирическому		численному	
Прямой трубопровод (длина 1 м)	8,0		8,7	
Колено 90°	13,1		14,0	
Колено 45°	6,7		6,1	
Тройник приточный (расходы 10 и 7 м ³ /ч соответственно)	0,4	27,8	0,5	32,5
Тройник симметричный с разделением потока	39,3	37,5	29,5	28,2
Поворотно-дисковый затвор: открытый - угол открытия	28,5		14,4	
	угол открытия 80°		35,7	
	угол открытия 65°		178,5	
			118,1	

Приведенные в таблице 1 результаты показывают, что из рассмотренных элементов сети при проектном расходе наиболее близкие результаты расчетов гидравлических потерь получены для прямых трубопроводов, колен с различными углами поворота и приточного тройника с одинаковыми проходными сечениями. На рис. 1 отображены примеры полей скоростей, полученных при проведении моделирования в ANSYS CFX.

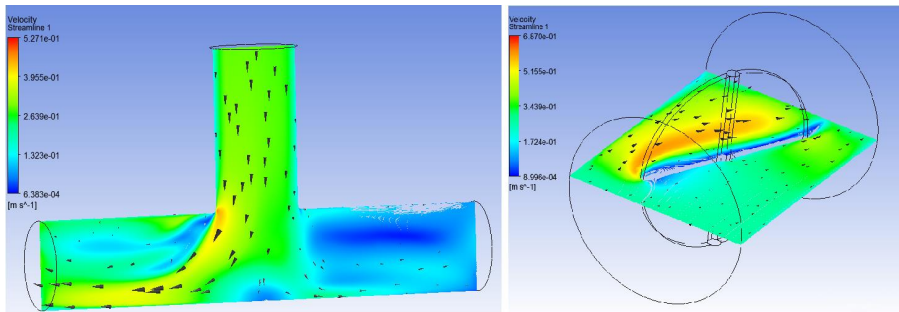


Рис. 7. Поле скоростей в симметричном тройнике на участке разделения (слева) и поворотно-дисковом затворе с углом открытия 65° (справа)

На втором этапе работы для элементов гидравлической сети водоснабжения с диаметрами трубопроводов 100, 110 и 150 мм были проведены расчеты гидравлических потерь на различных режимах работы. Примеры зависимости коэффициента гидравлического сопротивления (ζ) от расхода (Q) для трубопровода диаметром 150 мм приведены на рис. 2.

Полученные в ходе работы зависимости коэффициента гидравлических потерь от расхода показывают хорошую сходимость результатов расчетов по эмпирическому и численному методу. Расхождение между результатами на проектном режиме работы для различных элементов сети составляет от 5 до 10%. Расхождения могут быть вызваны частичным несоответствием рассмотренных геометрических моделей и недостаточным учетом характера течения жидкости как в ANSYS CFX при использовании модели турбулентности k- ϵ , так и в эмпирической модели, приближенно оценивающей вязкостный характер течения.

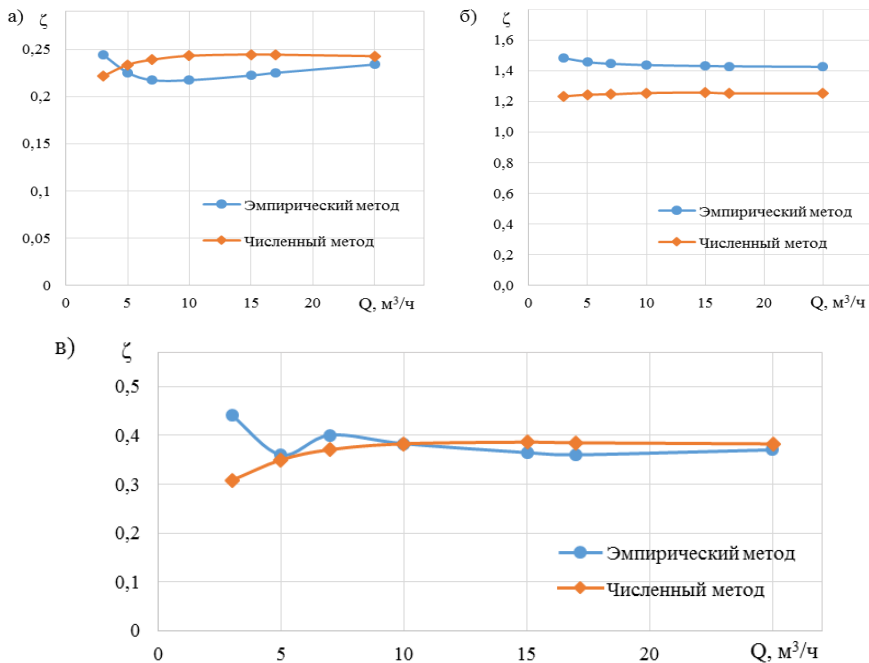


Рис. 8. а) Зависимость $\zeta=f(Q)$ в прямом трубопроводе длиной 1
 б) Зависимость $\zeta=f(Q)$ в поворотно-дисковом затворе с углом открытия 65°
 в) Зависимость $\zeta=f(Q)$ в колене с углом поворота 90°

Более точные результаты можно получить при компьютерном моделировании сети в целом, так как в этом случае будет учитываться взаимное влияние ее элементов. Также достоинством использования численного метода является возможность создания цифровых моделей для конкретной гидравлической сети. Цифровое моделирование позволяет прогнозировать потери при заданных параметрах рабочей среды.

Выводы. В работе выполнены сравнения расчетов гидравлических потерь на основе эмпирического и численного методов. Представленные в работе результаты показывают, что методика численного моделирования потерь в элементах гидравлической сети может быть применена при создании цифрового двойника гидравлических сетей «Водоканала». Полученные результаты будут использованы при выполнении комплексного проекта «Цифровые модели гидравлических сетей».

ЛИТЕРАТУРА:

- Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / Под ред. М.О. Штейнберга. – 3-е изд., пер. и доп. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
- ANSYS CFX User's Guide. Release 2019 R2. ANSYS, Inc. 2019.
- Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы – Л.: Машиностроение, 1966. – 364 с.
- Павлинова, И.И. Водоснабжение и водоотведение. Учебник для бакалавров / В.И. Баженов, И.Г. Губий. – 4-е изд., пер. и доп. – М.: Изд-во Юрайт, 2013. – 472 с.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МУСКУЛА

Введение. Пневмомускул представляет собой линейный двигатель одностороннего действия. В настоящее время главным производителем пневматических мускулов является немецкий концерн FESTO. Основным конструктивным элементом пневматических мускулов FESTO является гибкая цилиндрическая трубка из хлоропрена, армированная жесткими арамидными волокнами, формирующими трехмерную сетку.

При наполнении сжатым газом, пневмомускул увеличивается в поперечном направлении, уменьшаясь при этом в продольном, и развивая значительные усилия [1]. Его главными достоинствами по сравнению с пневмоцилиндром являются малые габариты, возможность плавного регулирования скорости. Также привод мускульного типа обладает теми же достоинствами, что и привод на пневмоцилиндрах: низкой стоимостью, возможностью применения в запыленных, влажных, взрывоопасных и радиационных средах, высоким ресурсом (до 5 млн циклов).

Среди недостатков пневматического мускула FESTO выделяют явление гистерезиса, обусловленное деформацией материала оболочки, а также внутренним трением, возникающим между армирующим волокном и эластичным материалом. Гистерезис усложняет создание точной системы управления. В настоящее время существует множество работ, посвященных моделированию гистерезисных петель пневмомускулов FESTO, которые условно можно разделить на две группы: использующие операторный (уравнения Прайсаха, Ишлинского) и дифференциальный подход (уравнения Дюгема) [2]. Однако разработанные такими способами модели гистерезисных петель привели к усложнению общей модели пневмомускула, и, как следствие, к усложнению создания систем управления, вызванное большим количеством трудно определяемых параметров.

Ранее было получено уточненное выражение усилия, развиваемого пневмомускулом, включающее выражения для изменения диаметра пневмомускула и угла укладки армирующей сетки [3]. Такая модель была разработана для упрощенных инженерных расчетов и в ней не учитывались свойства материала оболочки.

Целью данной работы является экспериментальное исследование статических характеристик пневмомускула (изменение длины и диаметра в зависимости от подаваемого давления) и сравнение данных, полученных в результате эксперимента с результатами моделирования по уточненному выражению.

Методика исследования. На основании модели [3] было выполнено моделирование статических характеристик пневмомускула $\epsilon(p)$, где p – рабочее давление, ϵ – относительное изменение длины пневмомускула, $\epsilon = x/L_0$ (x – ход пневмомускула, L_0 – начальная длина оболочки), $\lambda(p)$, где λ – относительное изменение диаметра, $\lambda = \Delta D/D_0$ (ΔD – изменение диаметра, D_0 – начальный диаметр оболочки).

Для проведения эксперимента и исследования характеристик оболочки пневмомускула был спроектирован специальный стенд. На рисунке 1 представлены принципиальная схема и фото экспериментальной установки для снятия статических характеристик пневматического мускула. Стенд имеет следующие составные части и оборудование: 1 – пневмомускул FESTO DMSP-10-400N-PM-CM, 2 – груз, 3 – блок подготовки воздуха (БПВ) FESTO LFR-QS4-5M-MICRO, 4 – распределитель FESTO DIDACTIC D:S-PSV-3/2-S-3+S, 5 – лазерный

датчик перемещения TWK D-40041 RP 12/300. Сжатый воздух подается в систему с помощью силовой установки (компрессор JUN-AIR модель 6-25).

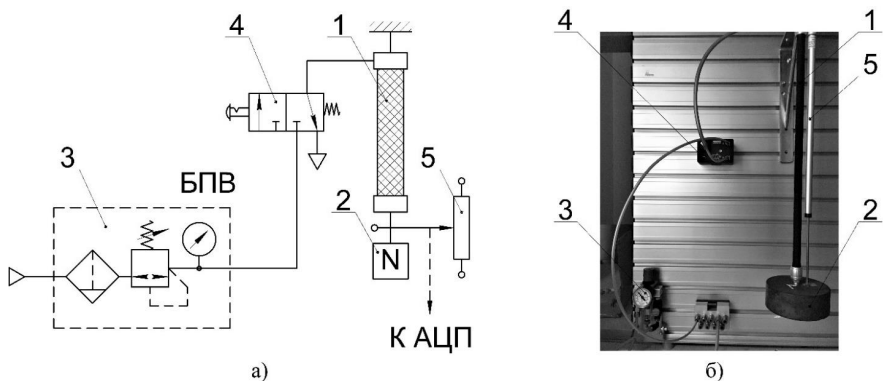


Рис. 1. Экспериментальная установка: а – принципиальная схема; б – фото

С помощью БПВ 3, осуществлялась настройка на определенное значение рабочего давления p . При открытии распределителя 4 сжатый воздух поступал в пневмомускул 1 с подвешенным грузом 2, в результате чего пневмомускул развивал усилие и перемещал груз на некоторое расстояние. Измерение диаметра оболочки до и после подачи сжатого воздуха осуществлялось с помощью штангенциркуля ШЦ-1-300 0,05 КЛБ, перемещение груза – с помощью лазерного датчика перемещения 5. Данные с лазерного датчика передавались в аналогово-цифровой преобразователь (АЦП).

Эксперимент проводился для масс груза $m = 2,5; 5; 7,5$ кг при рабочем давлении $p = 0,1 - 0,7$ МПа.

Результаты исследования. На рисунках 2 – 4 представлены результаты моделирования и эксперимента для разных масс груза. Сплошными кривыми обозначены результаты при подъеме пневмомускулом груза, штриховыми кривыми – при опускании пневмомускулом груза, точками обозначены результаты моделирования.

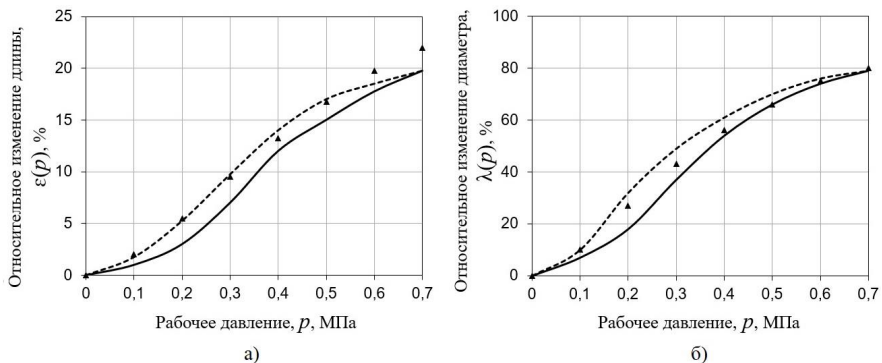


Рис. 2. Сравнение результатов эксперимента с результатами моделирования для массы груза $m = 2,5$ кг: а) – $\varepsilon(p)$, б) – $\lambda(p)$

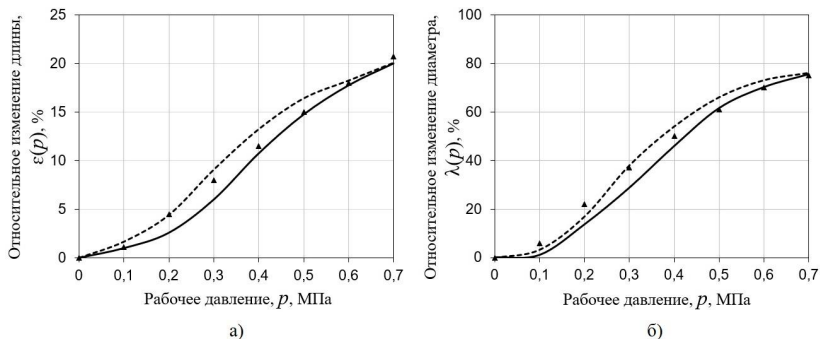


Рис. 3. Сравнение результатов эксперимента с результатами моделирования для массы груза $t = 5$ кг: а) – $\varepsilon(p)$, б) – $\lambda(p)$

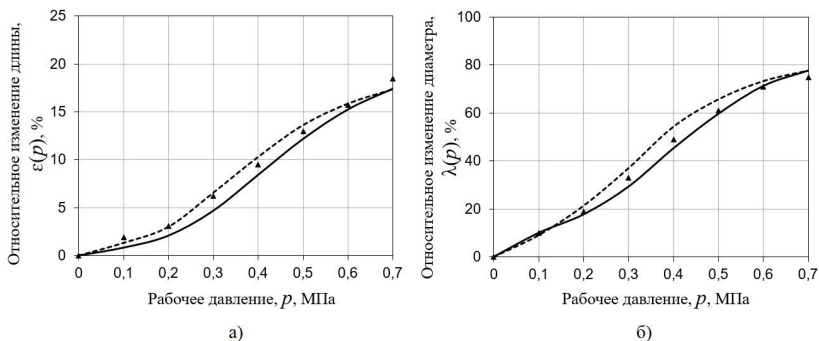


Рис. 4. Сравнение результатов эксперимента с результатами моделирования для массы груза $t = 7,5$ кг: а) – $\varepsilon(p)$, б) – $\lambda(p)$

Обсуждение результатов. Модель качественно правильно описывает изменение давления – кривая, построенная по результатам моделирования, отражает закон изменения длины и диаметра в зависимости от давления в оболочке пневмомускула. Количественная оценка показала, что, в целом, разработанная модель дает удовлетворительную сходимость результатов моделирования для зависимостей $\varepsilon(p)$ и $\lambda(p)$ (в пределах 15,5 %) с экспериментальными данными на режимах с высоким рабочим давлением ($p = 0,3 - 0,7$ МПа) как для линии наполнения, так и для линии опустошения.

Выводы. Из полученных результатов можно сделать вывод, что разработанная модель может в дальнейшем применяться при разработке промышленных устройств для простых операций на базе пневматического мускула.

ЛИТЕРАТУРА:

1. https://www.festo.com/cat/ru_ru/data/doc_engb/PDF/EN/DMSP_EN.PDF.
2. Xie S L, Liu H T, Mei J P, et al. Modeling and compensation of asymmetric hysteresis for pneumatic artificial muscles with a modified generalized Prandtl-Ishlinskii model // *Mechatronics*. 2018. Vol. 52. P. 49 – 57.
3. Донской А.С., Коткас Л.А. Математическое моделирование статических характеристик пневматического мускула // *Вестник УГАТУ*. 2018. № 4. С. 48-55.

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ С ОТКРЫТЫМИ ИСХОДНЫМИ КОДАМИ
ДЛЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ МАШИН

Актуальность. Существует множество гидравлических машин, имеющих различные характеристики, работающих в различных отраслях промышленности. Одной из важнейших целей проектирования такого рода машин является обеспечение эффективной работы в течение всего срока эксплуатации. Существуют различные программные комплексы, разработанные с целью оптимизации процесса проектирования, и как следствие, ускорения выполнения поставленной задачи [1]. Программные продукты PTC Mathcad, MATLAB – для математических расчётов, КОМПАС-3D, SOLIDWORKS – системы двухмерного и трехмерного моделирования, ANSYS – программное обеспечение для инженерных расчетов и численного моделирования и ряд других являются коммерческими.

В настоящее время все более популярным становятся пакеты с открытыми исходными кодами – Open Source. Они распространяются на основе открытых лицензий, таких как: GNU GPL, GNU LGPL [2]. Использование такого программного обеспечения снимает большинство ограничений для пользователей, позволяет оптимизировать подходы к решению инженерных задач. Энергетические и эксплуатационные качества гидравлических машин во многом являются функцией формы проточной части. Чтобы добиться оптимизированной конструкции, необходимо выполнять большой объём численных исследований с использованием современных суперкомпьютерных технологий. Все это требует больших вычислительных ресурсов с целью их оптимизации.

Цели и задачи работы. В лаборатории гидромашиностроения СПбПУ ведутся работы по созданию комплекса для проектирования и цифрового моделирования оптимизированных конструкций гидравлических машин с использованием программного обеспечения с открытыми исходными кодами. В данной работе для расчётов используются алгоритмы, реализованные на языке программирования Python; для трехмерного проектирования используется FreeCAD – пакет трехмерного проектирования с открытым исходным кодом, написанным на языке Python. Для численного исследования процессов течения жидких сред применяется OpenFOAM – открытая интегрируемая платформа для численного моделирования задач вычислительной гидродинамики [3].

Результаты. Была разработана концепция по использованию Open Source продуктов, позволяющих заменить частично или полностью коммерческие (рис. 1).

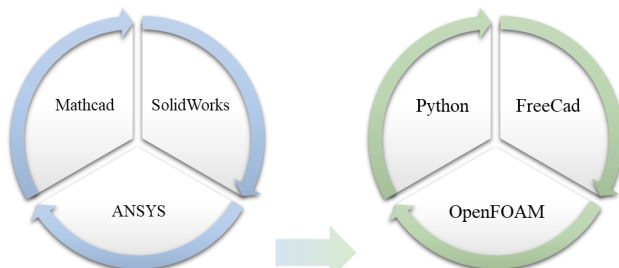


Рис. 1. Концепция использования Open Source продуктов вместо коммерческого программного обеспечения при проектировании

В качестве первого этапа разработки реализована методика проектирования центробежного насоса (рис. 2) и струйного аппарата (рис. 3), т. к. у лаборатории гидромашиностроения СПбПУ накоплен значительный опыт в разработке машин подобного типа [4, 5].

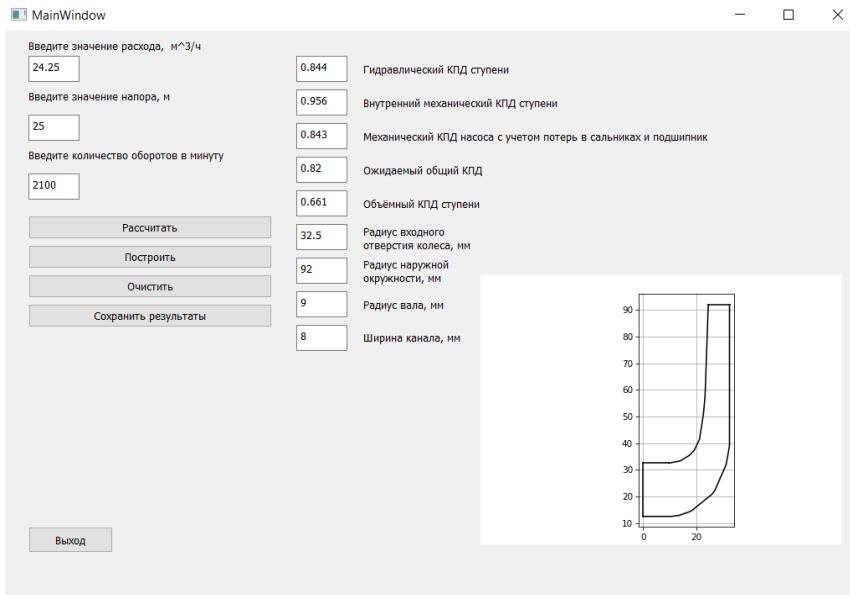


Рис. 2. Пользовательский интерфейс модулей программного комплекса для расчета центробежного насоса

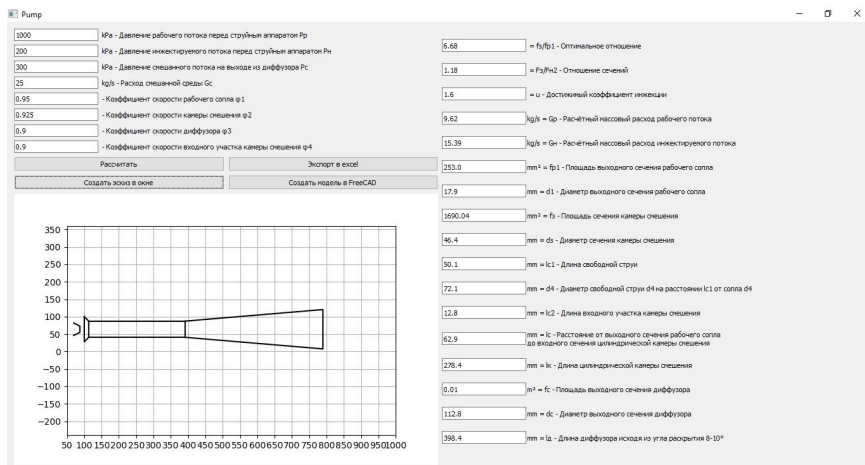


Рис. 3. Пользовательский интерфейс модулей программного комплекса для расчета струйного насоса

Алгоритмы расчета и параметризации основных геометрических параметров были реализованы на языке Python. Полученные результаты расчётов становятся базой для последующего создания трёхмерной модели. Сгенерированная на основе трехмерной модели жидкотельная расчётная область разбивается на ячейки для последующего расчёта и анализа методами вычислительной гидродинамики в среде OpenFOAM. Для получения оптимизированной конструкции необходимо выполнить ряд подобных расчётов, целью которых является формирование эффективного множества расчётных вариантов в зависимости от критериев оптимальности.

Выводы. Создание программного комплекса с использованием программного обеспечения с открытыми исходными кодами для проектирования и цифрового моделирования оптимизированных конструкций гидравлических машин дает возможность сократить время на проектирование и оптимизацию конструкции за счёт автоматизации процесса. Использование различных методик проектирования и оптимизации позволяет сделать процесс проектирования гибким и достичь максимальной гидродинамической эффективности проектируемой машины.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Рындин А.А., Сапегин С.В. Особенности разработки развивающихся программных комплексов. Вестник Воронежского государственного технического университета, 10 (5-1), 74-77. (2014)
2. Онтужев В.В., Пузанова Г.А., & Антамошкин О.А. Особенности применения программ, распространяемых по лицензии GNU/GPL в российских организациях. Актуальные проблемы авиации и космонавтики, 1 (8), 401-402. (2012)
3. Читалов Д.И., Калашников С.Т. Разработка приложения для подготовки расчетных сеток посредством утилиты snappyHexMesh программной среды OpenFOAM. Программные продукты и системы, 31 (4), 715-722. (2018)
4. Иванов О.А., Жарковский А.А. Расчет и проектирование промежуточной ступени насоса ЦНС 300-360 с использованием различных методик. Неделя науки СПбПУ Материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. С. 173-175. (2018)
5. Ломакин А.А. Центробежные и осевые насосы. Издательство «Машиностроение» Москва, 1966

УДК 621.541.1

Н.А. Журкин, Л.А. Коткас, А.С. Донской
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО МУСКУЛА В СРЕДЕ ANSYS MECHANICAL APDL

Введение. Пневматический мускул (ПМ) – объемный пневматический двигатель линейного перемещения одностороннего действия. ПМ имеет ряд преимуществ перед традиционными пневматическими цилиндрами: высокие усилия в начале хода, низкая масса, нечувствительность к загрязнению сжатого воздуха и окружающей среды, отсутствие подвижных соединений и, соответственно, трения в уплотнительных узлах. Данные преимущества обуславливают все более широкое применение ПМ в различных пневмоприводных механизмах. Основным элементом конструкции, определяющим рабочие характеристики ПМ, является эластичная оболочка, армированная нитями. Существуют различные конструктивные варианты оболочек ПМ с наружным армированием или армированием непосредственно в материале оболочки. Армирующие нити могут располагаться параллельно или под некоторым углом к оси оболочки. Армирование может быть многослойным, симметричным и несимметричным. Существуют различные сочетания расположения нитей. Наиболее распространенными среди всех вариантов ПМ являются ПМ

модельного ряда DMSP, серийно выпускаемый компанией Festo AG & Co. KG (Германия). Данный ПМ представляет собой эластичную оболочку с двухслойным симметричным армированием материала [1].

Несмотря на относительную простоту конструкции, математическое описание работы ПМ является крайне сложной задачей, что вызвано особенностями деформации эластичной армированной оболочки под внутренним давлением. Основной подход к решению данной задачи связан с выводом различных аналитических выражений, описывающих изменение основных геометрических параметров ПМ и развиваемого им усилия в зависимости от давления сжатого воздуха. Недостатком данного подхода является необходимость экспериментального определения корректирующих коэффициентов, которые, при этом, не обеспечивают достаточной универсальности аналитических зависимостей. Указанные зависимости могут включать от шести [2] до двадцати одного экспериментального коэффициента [3], что существенно усложняет их применение.

Достаточно эффективным способом решения рассматриваемой задачи может быть применение метода конечных элементов (МКЭ). Данный подход требует применения специализированных программных средств, одним из которых является пакет ANSYS, а именно среда Mechanical APDL, которая позволяет учесть физические свойства материалов оболочки и армирующих нитей, в том числе гиперупругие свойства полимерных материалов, задать все необходимые геометрические параметры, внешние нагрузки, а также визуализировать результаты расчета. Поскольку APDL фактически является параметрическим языком программирования (ANSYS Parametric Design Language), возможна разработка текстов программ, в которых удобно реализуется управление переменными данными, что позволяет сократить время на исследование влияния различных параметров на характеристики ПМ

Цель исследования. Целью настоящей работы является формирование подхода к моделированию ПМ с применением МКЭ в среде ANSYS Mechanical APDL.

Методика исследования. Рассматриваемая задача с целью упрощения решается в осесимметричной постановке. Тип конечных элементов для моделирования оболочки – двухузловые элементы типа SHELL208. Армирующие нити моделируются элементами REINF263. Для армирования задается диаметр нитей, шаг между ними, угол наклона по отношению к оси оболочки и их относительное расположение по толщине оболочки. Для материала эластичной оболочки и нитей задаются модуль упругости и коэффициент Пуассона. Следует отметить, что помимо предлагаемого варианта моделирования ПМ в среде Mechanical APDL, возможно также решение задачи в полностью трехмерной постановке.

Расчетная схема ПМ и схема армирования эластичной оболочки представлены на рисунке 1. Исходные данные, принятые для моделирования, представлены в таблице 1.

Результаты исследования. На рисунке 2 представлены результаты моделирования, отражающие зависимость перемещения свободного конца ПМ при значениях давления сжатого воздуха 0,1 МПа, 0,2 МПа и 0,3 МПа.

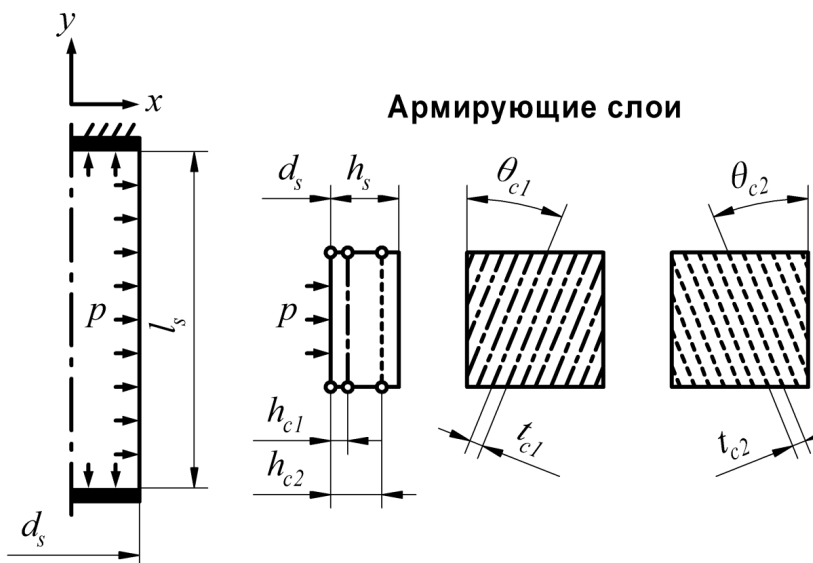


Рис. 1. Расчетная схема ПИМ и схема армирования эластичной оболочки

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	Обозначение	Ед. измерения	Значение
Диаметр оболочки	d_s	м	0,01
Толщина оболочки	h_s	м	0,001
Длина оболочки	l_s	м	0,1
Модуль упругости эластичной оболочки	E_s	Па	$6,9 \times 10^6$
Коэффициент Пуассона эластичной оболочки	μ_s	–	0,49
Диаметр армирующей нити	d_c	м	0,0002
Модуль упругости армирующей нити	E_c	Па	7×10^{10}
Коэффициент Пуассона армирующей нити	μ_c	–	0,36
Положение первого слоя армирования	h_{c1}	–	0,25
Положение второго слоя армирования	h_{c2}	–	0,75
Начальный угол армирования первого слоя	θ_{c1}	град	28
Начальный угол армирования второго слоя	θ_{c2}	град	-28
Шаг между нитями первого слоя	t_{c1}	м	0,005
Шаг между нитями второго слоя	t_{c2}	м	0,005

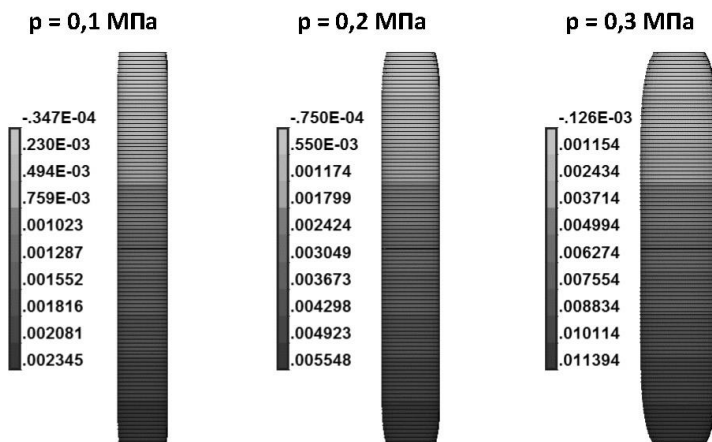


Рис. 2. Деформация оболочки ПМ

Из результатов моделирования видно, что с ростом давления сжатого воздуха перемещение свободного конца пневматического мускула увеличивается. Также при повышении давления воздуха увеличивается диаметр оболочки. Наибольшая деформация оболочки наблюдается вблизи её концевых заделок, центральная часть ПМ при этом имеет практически цилиндрическую форму. Полученная зависимость перемещения от давления носит нелинейный характер и качественно соответствует характеристикам серийно изготавливаемых ПМ. Для обеспечения высокой степени совпадения результатов моделирования с опытными данными требуется точный учет свойств материалов оболочки и армирующих нитей.

Выводы. Таким образом, предложенный подход к моделированию пневматических мускулов в среде ANSYS Mechanical APDL обеспечивает ряд преимуществ перед численным моделированием: учет физических свойств материалов оболочки и армирующих нитей, учет характера армирования и т.д. При этом, расчет в среде Mechanical APDL является достаточно трудоемким и его применение целесообразно при проектировании новых пневматических мускулов или других пневматических двигателей с эластичными элементами, верификации аналитических или численных решений, или решении сложных междисциплинарных задач.

Дальнейшие исследования будут направлены на более детальное исследование статических и динамических характеристик ПМ, и развитие предложенного подхода к моделированию.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Actuator. German Patent No. DE29906626 U1, 1999; Actuating means. US patent No. US6349746 B1, 2002.
2. Sarosi J., Fabulya Z. New Function Approximation for the Force Generated by Fluidic Muscle // International Journal of Engineering, Annals of Faculty of Engineering Hunedoara. 2012. Vol. 10(2). P. 105-110.
3. Hosovsky A., Havran M. Hill's muscle model-based modelling of pneumatic artificial muscle // Annals of DAAAM for 2011 and Proceedings of the 22nd International DAAAM Symposium, Vienna, 2011. P. 1005 – 1006.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ПРИВОДА
В СРЕДЕ MATLAB SIMULINK

Введение. Математическое моделирование является важным этапом проектирования пневматических приводов, пневмоприводных машин и механизмов, и позволяет исследовать их работу при различных конструктивных и эксплуатационных параметрах. Вопросам математического моделирования посвящено множество работ, например [1 – 3]. Однако реализация разработанных математических моделей, в связи с необходимостью численного интегрирования систем дифференциальных уравнений, может представлять существенные сложности, в особенности в инженерной практике, в связи с чем остается актуальным вопрос совершенствования методики выполнения расчетов.

В работе [3] приводится методика математического моделирования типового пневматического привода линейного перемещения в среде Mathcad. При этом, у данного подхода есть некоторые недостатки, связанные с особенностями записи и отладки программ в данной среде. Современные подходы к математическому моделированию связаны с графическим программированием, которое позволяет, не владея определенным языком программирования, реализовать сложные математические модели, в том числе для решения междисциплинарных задач. Одним из программных пакетов, позволяющих формировать модель в графическом виде является Matlab Simulink.

Цель исследования. Целью настоящей работы является решение математической модели типового пневматического привода линейного перемещения в среде Matlab Simulink и сравнение полученных результатов с решением модели по существующей методике в среде Mathcad.

Методика исследования. Расчетная схема типового пневматического привода линейного перемещения представлена на рисунке 1.

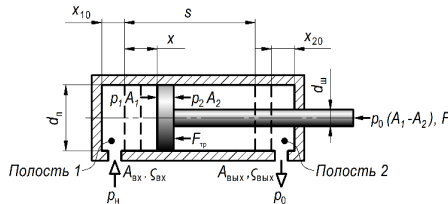


Рис. 1. Расчетная схема типового пневматического привода

Работа подобного привода описывается следующей системой уравнений [3]:

$$\begin{cases} m\ddot{x} = p_1 A_1 - p_2 A_2 - p_0 (A_1 - A_2) - F_{тр} - F, \\ \dot{p}_1 = \frac{k A_{вх} \sqrt{RT_H}}{A_1 (x + x_{10}) \sqrt{\zeta_{вх}}} \sqrt{p_H^2 - p_1^2} - \frac{k p_1}{(x + x_{10})} \dot{x}, \\ \dot{p}_2 = - \frac{k A_{вых} \sqrt{RT_H}}{A_2 (s - x + x_{20}) \sqrt{\zeta_{вых}}} \left(\frac{p_2}{p_H} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_2^2 - p_0^2} + \frac{k p_2}{(s - x + x_{20})} \dot{x}, \end{cases}$$

где: m – масса подвижных частей привода; x – координата положения поршня, p_1, p_2 – значения давления воздуха в полостях 1 и 2 соответственно; A_1, A_2 – значения эффективных площадей полостей 1 и 2 соответственно; $F_{тр}$ – суммарная сила сухого и вязкого трения; F – полезная нагрузка; k – показатель адиабаты, R – универсальная газовая постоянная, T_n – температура воздуха в пневматической линии нагнетания, x_{10}, x_{20} – приведенные координаты мертвых объемов в полостях 1 и 2 соответственно; $A_{вх}, A_{вых}$ – площади проходных сечений линий нагнетания и выхлопа соответственно, $\zeta_{вх}, \zeta_{вых}$ – коэффициенты сопротивлений пневматических линий нагнетаний и выхлопа соответственно, p_n – давление в пневматической линии нагнетания, $p_{вых}$ – давление в пневматической линии выхлопа.

Реализация представленной системы уравнений средствами Simulink показана на рисунке 2.

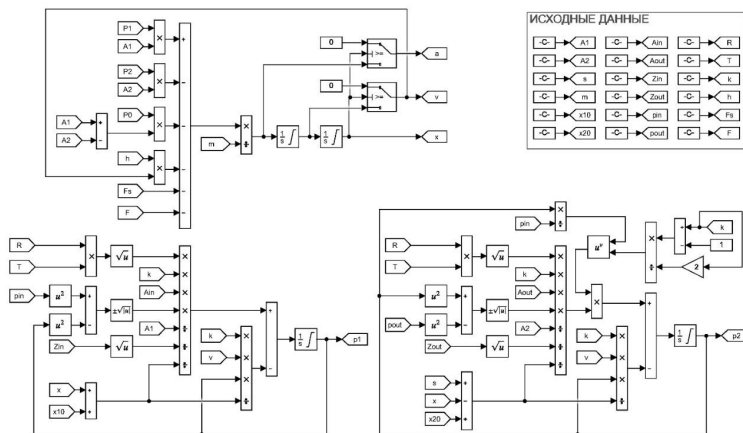


Рис. 2. Математическая модель, реализованная в Simulink

Из рисунка 2 видно, что все постоянные и переменные значения, математические и логические операторы представлены определенными блоками, между которыми устанавливаются необходимые взаимосвязи. Данный подход к моделированию существенно упрощает реализацию математической модели. Основные параметры пневматического двигателя, использованные при моделировании, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	Значение	Параметр	Значение	Параметр	Значение
d_1 , м	0,030	$d_{вх}$, м	0,003	R , Н/м·с	287
d_2 , м	0,010	$d_{вых}$, м	0,003	T , К	293
s , м	0,100	ζ_1	12	k	1,4
m , кг	1	ζ_2	12	h , Н/м·с	10
x_{10} , м	0,02	$p_{вых}$, Па	5×10^5	$F_{сг}$, Н	50
x_{20} , м	0,02	$p_{вх}$, Па	1×10^5	F , Н	150

Результаты исследования. На рисунках 3 и 4 представлены графики временных зависимостей перемещения поршня, его скорости и изменения давления в рабочих полостях

пневмоцилиндра. При решении в среде Matlab Simulink был использован метод Дормана-Принса (ode45) с переменным шагом интегрирования при максимальном значении шага интегрирования 0,0001 с, решение в среде Mathcad выполнялось методом Эйлера с постоянным шагом интегрирования 0,0001 с.

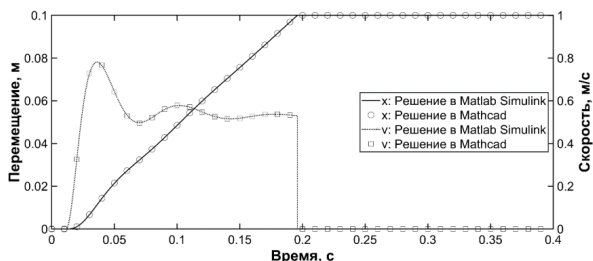


Рис. 3. Зависимость перемещения и скорости поршня от времени

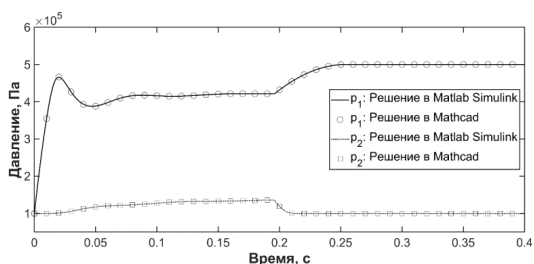


Рис. 4. Зависимость давления в рабочих полостях пневмоцилиндра от времени

Из графиков видно, что результаты, полученные по предлагаемой методике математического моделирования в Matlab Simulink, совпадают результатами, полученными по существующей методике. Некоторые отличия связаны с более высокой точностью интегрирования предлагаемой методики при одинаковом временном шаге.

Выводы. Таким образом, применение графической среды Matlab Simulink для математического моделирования пневматических приводов, обеспечивая точность не ниже существующей методики, упрощает процесс реализации математических моделей, а также существенно расширяет возможности математического моделирования сложных приводов и систем. При этом в связи с более высокой точностью применяемого численного метода, возможно увеличить шаг интегрирования без потери точности решения, что позволит сократить время расчета. Среда Matlab Simulink также позволяет формировать пользовательские блоки, описывающие определенные элементы пневматических систем, что позволяет частично автоматизировать процесс моделирования.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Герц, Е.В. Динамика пневматических приводов машин-автоматов / Е.В. Герц, Г.В. Крейнин. – М.: Машиностроение, 1964. – 236 с.
2. Погорелов В.И. Газодинамические расчеты пневматических приводов / В.И. Погорелов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 184 с.
3. Донской А.С. Моделирование и расчет пневматических приводов: Учеб. пособие. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 87 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПНЕВМОПРИВОДНОГО НАСОСА
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ С ТАНДЕМНЫМ ПРИВОДОМ

Введение. Пневмоприводные насосы высокого давления (ПНВД), обладая рядом существенных преимуществ перед насосами высокого давления других типов, широко применяются в различных отраслях промышленности: машиностроении, судостроении, нефтехимической отрасли и других. Основными достоинствами ПНВД являются: пожаро- и взрывобезопасность, экологическая безопасность, простота конструкции, низкая масса, высокая надежность, возможность перекачивания различных, в том числе агрессивных, жидкостей, эмульсий, суспензий и т.д. [1, 2].

Для повышения развиваемого насосом давления применяют тандемную схему приводной секции. При этом актуальной является задача определения характеристик подобных насосов, эффективное решение которой возможно с применением математического моделирования.

Цель исследования. Целью настоящей работы является разработка математической модели ПНВД с тандемным приводом и определения зависимости объемной подачи насоса от давления перекачиваемой жидкости на его выходе.

Методика исследования. Принципиальная схема ПНВД с тандемным приводом, на основании которой разрабатывается математическая модель, представлена на рисунке 1.

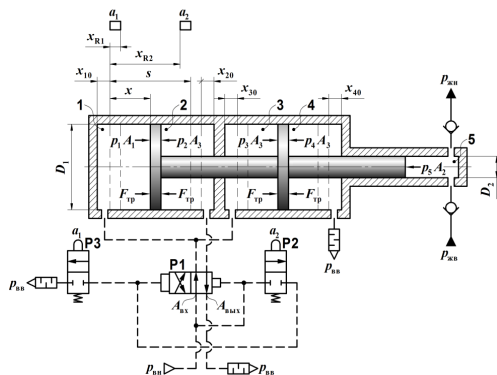


Рис. 1. Принципиальная схема ПНВД с тандемным приводом

При разработке математической модели были приняты следующие допущения: газодинамические процессы, происходящие в полостях пневматического приводного цилиндра, являются адиабатическими, в пневматических линиях – изотермическими; переключение клапанно-распределительной аппаратуры происходит мгновенно; объемный модуль упругости перекачиваемой жидкости остается постоянным; потери давления на клапанах всасывания и нагнетания не учитываются, полость насосной секции на такте всасывания полностью заполняется перекачиваемой жидкостью. Также для упрощения математической модели подвод сжатого воздуха к полостям 1 и 3 считается независимым. Таким образом, математическая модель ПНВД двойного действия включает в себя уравнение

движения поршня и уравнения изменения давлений в пневматических и гидравлической полости насоса [3 – 5].

Уравнение движения поршня и связанных с ним плунжеров имеет следующий вид:

$$m\dot{x} = A_1 p_1 - (A_1 - A_2)(p_2 - p_3 + p_4) - A_2 p_5 - F_{тр}, x \in [0; s], \quad (1)$$

где: m – масса поршня; x – координата положения поршня; A_1 – площадь поршня приводной секции; A_2 – площадь плунжера насосной секции, p_1, p_2, p_3, p_4 – давление воздуха в рабочих полостях приводной секции 1, 2, 3 и 4 соответственно; p_5 – давление перекачиваемой жидкости в рабочей полости 5 насосной секции; $F_{тр}$ – сила трения; s – полный ход поршня.

Изменение давления воздуха в рабочих полостях приводной секции на такте нагнетания описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{p}_1 &= \frac{kA_{вн}\sqrt{RT_{вн}}}{A_1(x+x_{10})\sqrt{\zeta_{вн}}} \sqrt{p_2^2 - p_1^2} - \frac{kp_1}{(x+x_{10})} \dot{x}, p_1 \in [p_{вв}; p_{вн}], \\ \dot{p}_2 &= -\frac{kA_{вв}\sqrt{RT_{вв}}}{(A_1 - A_2)(s-x+x_{20})\sqrt{\zeta_{вв}}} \left(\frac{p_2}{p_{вн}}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_2^2 - p_{вв}^2} + \frac{kp_2}{(s-x+x_{20})} \dot{x}, p_2 \in [p_{вв}; p_{вн}], \\ \dot{p}_3 &= \frac{kA_{вн}\sqrt{RT_{вн}}}{(A_1 - A_2)(x+x_{30})\sqrt{\zeta_{вн}}} \sqrt{p_{вн}^2 - p_3^2} - \frac{kp_3}{(x+x_{30})} \dot{x}, p_3 \in [p_{вв}; p_{вн}], \\ \dot{p}_4 &= -\frac{kA_{вв}\sqrt{RT_{вв}}}{(A_1 - A_2)(s-x+x_{40})\sqrt{\zeta_{вв}}} \left(\frac{p_4}{p_{вн}}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_4^2 - p_{вв}^2} + \frac{kp_4}{(s-x+x_{40})} \dot{x}, p_4 \in [p_{вв}; p_{вн}], \end{aligned} \right. \quad (2)$$

где: k – показатель адиабаты; R – универсальная газовая постоянная; $T_{вн}, T_{вв}$ – температура воздуха в пневматических линиях нагнетания и выхлопа; $x_{10}, x_{20}, x_{30}, x_{40}$ – приведенные координаты мертвых объемов в рабочих полостях 1, 2, 3 и 4 приводной секции; $A_{вн}, A_{вв}$ – площади проходных сечений линий нагнетания и выхлопа соответственно, $\zeta_{вн}, \zeta_{вв}$ – коэффициенты сопротивлений пневматических линий нагнетания и выхлопа соответственно, $p_{вн}, p_{вв}$ – давление воздуха в пневматических линиях нагнетания и всасывания.

Аналогично записываются уравнения изменения давлений для такта всасывания насоса:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{p}_1 &= -\frac{kA_{вв}\sqrt{RT_{вв}}}{A_1(x+x_{10})\sqrt{\zeta_{вв}}} \left(\frac{p_1}{p_{вн}}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_1^2 - p_{вв}^2} - \frac{kp_1}{(x+x_{10})} \dot{x}, p_1 \in [p_{вв}; p_{вн}], \\ \dot{p}_2 &= \frac{kA_{вн}\sqrt{RT_{вн}}}{(A_1 - A_2)(s-x+x_{20})\sqrt{\zeta_{вн}}} \sqrt{p_{вн}^2 - p_2^2} + \frac{kp_2}{(s-x+x_{20})} \dot{x}, p_2 \in [p_{вв}; p_{вн}], \\ \dot{p}_3 &= -\frac{kA_{вв}\sqrt{RT_{вв}}}{(A_1 - A_2)(x+x_{30})\sqrt{\zeta_{вв}}} \left(\frac{p_3}{p_{вн}}\right)^{\frac{k-1}{2k}} \sqrt{p_3^2 - p_{вв}^2} - \frac{kp_3}{(x+x_{30})} \dot{x}, p_3 \in [p_{вв}; p_{вн}], \\ \dot{p}_4 &= \frac{kA_{вн}\sqrt{RT_{вн}}}{(A_1 - A_2)(s-x+x_{40})\sqrt{\zeta_{вн}}} \sqrt{p_{вн}^2 - p_4^2} + \frac{kp_4}{(s-x+x_{40})} \dot{x}, p_4 \in [p_{вв}; p_{вн}], \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Уравнение изменения давления перекачиваемой жидкости в рабочей полости 5

насосной секции имеет следующий вид:

$$\dot{p}_5 = \frac{E}{V} A_2 \dot{x}, p_5 \in [p_{жк}; p_{жн}], \quad (4)$$

где: E – объемный модуль упругости перекачиваемой жидкости; V – объем полости 5 насосной секции; $p_{жк}$, $p_{жн}$ – давление перекачиваемой жидкости в гидравлических линиях всасывания и нагнетания.

Для исследования работы ПНВД двойного действия были приняты исходные данные, представленные в таблице 1. Перекачиваемой жидкостью является пресная вода.

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	D_1 , м	D_2 , м	s , м	x_{R1} , м	x_{R2} , м	$D_{вн}$, м	$D_{вын}$, м	$\zeta_{вх}$	$\zeta_{вых}$
Значение	0,150	0,012	0,060	0,003	0,057	0,006	0,010	12	9

Результаты исследования. Совместное решение уравнений (1)-(4) позволяет получить характеристики ПНВД двойного действия при различных условиях эксплуатации. На рисунке 2 представлены графики зависимости минутной подачи насоса от давления перекачиваемой жидкости на выходе.

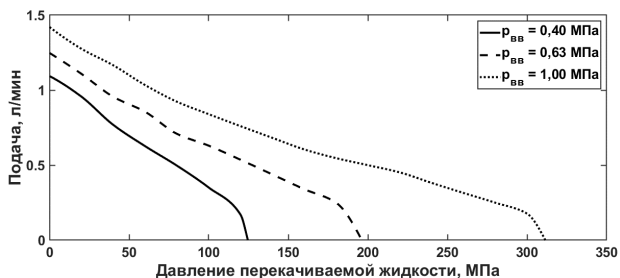


Рис. 2. Зависимость подачи ПНВД от давления перекачиваемой жидкости

Из результатов численного моделирования видно, что зависимость подачи ПНВД от давления перекачиваемой жидкости носит нелинейный характер. Подача снижается с ростом давления жидкости, что обусловлено возрастающей нагрузкой на составной поршень и, соответственно, снижением частоты работы насоса.

Выводы. Таким образом, разработанная модель позволяет определить рабочие характеристики двухпоршневого ПНВД и может быть использована при разработке новых и модернизации существующих насосов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Пневматические устройства и системы в машиностроении: Справочник / Е.В. Герц, А.И. Кудрявцев, О.В. Ложкин и др. Под общ. ред. Е.В. Герца. – М.: Машиностроение, 1981. – 401 с.
2. Башга, Т.М. Объемные насосы и гидравлические двигатели гидросистем: Учебник для вузов / Т.М. Башга. – М.: Машиностроение, 1974. – 606 с.
3. Гидросистемы высоких давлений / Ю.Н. Лаптев, В.И. Глухов, Я.Я. Якименко и др. / Под общ. ред. Ю.Н. Лаптева. – М.: Машиностроение, 1973. – 152 с.
4. Погорелов В.И. Газодинамические расчеты пневматических приводов / В.И. Погорелов. – Л.: Машиностроение, 1971. – 184 с.
5. Донской А.С. Моделирование и расчет пневматических приводов: Учеб. пособие. / А.С. Донской – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 87 с.

ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВПРЫСКА
ДЛЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ МОЩНОСТЬЮ 140 КВТ

ВВЕДЕНИЕ

Многokrатное впрыскивание является обычной практикой в современных двигателях с воспламенением от сжатия. Многokrатное впрыскивание лучше, чем впрыск топлива за один импульс, так как это приводит к снижению вредных выбросов и повышению тепловой эффективности рабочего цикла, что определяется лучшим сгоранием и более высокими скоростями тепловыделения [1]. Пилотный впрыск топлива упрощает процесс воспламенения и одновременно снижает выбросы NO_x и сажи [2]. Тем не менее, детальное взаимодействие распыления и сгорания при многokrатном впрыскивании должно быть лучше изучено для уточнения и дальнейшего продвижения характеристик впрыскивания топлива, которые приводят к повышению эффективности двигателя и снижению вредных выбросов.

Попытки уменьшить выбросы и увеличить мощностные показатели обычно противоречат друг другу. Например, для снижения выбросов NO_x необходима более поздняя подача основной части топлива, что снижает температуру и давление в процессе сгорания. В тот же момент, для повышения полноты сгорания требуется более ранняя подача и увеличение продолжительности периода между завершением впрыскивания и открытием выпускных клапанов [3]. Так, позднее подвпрыскивание для повышения рабочей температуры каталитического нейтрализатора [4] абсолютно не нужно для рабочего процесса ДВС. Он осуществляется через $120...220^\circ$ после ВМТ и не участвует в получении полезной энергии. Позднее подвпрыскивание периодически применяется также для очистки (выжигания сажи) сажевого фильтра.

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Целью работы является сравнение показателей высокооборотного дизельного двигателя при использовании классической и многофазной характеристики впрыскивания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить расчеты рабочего процесса (РП) дизельного двигателя мощностью 140 кВт (прототип ЯМЗ 5340) на номинальном режиме работы и при 1000 об/мин;
2. Выполнить оптимизационные расчеты РП двигателя с использованием многофазного впрыска топлива;
3. Исследовать влияние многофазной характеристики впрыска на токсичность выхлопных газов и характеристики двигателя;
4. Проанализировать полученные результаты.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Объект исследования – двигатель мощностью 140 кВт, рядный, 4-х цилиндровый, ход поршня $S=0,128$ м; диаметр цилиндра $D=0,105$ м; степень сжатия $\varepsilon=17,5$. В качестве основных режимов работы двигателя выбраны: номинальный (частота вращения коленчатого вала $n=2300$ об/мин) и частичный режим ($n=1000$ об/мин).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ РП

Расчеты выполнены с использованием программного комплекса РП-2018 [5]. Полученные результаты сведены в таблицу 1. В таблице 1: N – мощность, кВт; M – крутящий момент, Н·м; α – коэффициент избытка воздуха; P_z – максимальное давление сгорания, МПа; η_e – эффективный коэффициент полезного действия (КПД); η_m – механический КПД; G_T –

часовой расход топлива, кг/час; g_e – удельный расход топлива, г·кВт/час; $F_{\text{нвпр}}$ – угол начала впрыска топлива; $F_{\text{впр}}$ – продолжительность впрыска; T_z – максимальная температура сгорания, К; NO_x – эмиссия оксидов азота, ppm. Форма исследованных характеристик впрыска представлена на рисунке 1.

Таблица 1. Основные параметры РП

Режим работы	Номинальный	Частичный	Номинальный с профилированием характеристики впрыска	Частичный с профилированием характеристики впрыска
n , об/мин	2300	1000	2300	1000
N , кВт	141,3	36,5	142,5	39,5
M , Н·м	586,8	348,6	591,8	377,2
α	2,286	3,812	2,286	3,812
P_k	3	2,5	3	2,5
P_z , МПа	18,0	14,4	17,3	14,3
η_e	0,399	0,386	0,402	0,418
η_m	0,84	0,80	0,84	0,80
G_T , кг/час	30	8	30	8
g_e , г·кВт/ч	212,3	219,2	210,5	202,5
$F_{\text{нвпр}}$	-10	-10	-10	-5
$F_{\text{впр}}$	25	25	25	13
NO_x , ppm	285,0	94,6	253,3	93,7

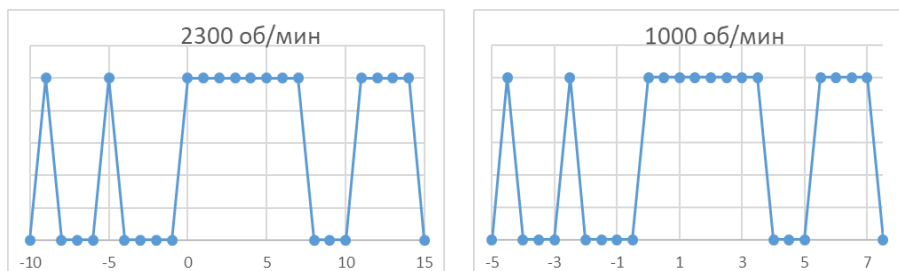


Рис. 1. Дифференциальные характеристики впрыскивания. По оси абсцисс – угол п.к.в.

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ ХАРАКТЕРИСТИКИ

При исследовании влияния характеристики впрыска на РП двигателя на частичном режиме ($n=1000$ об/мин) снижения уровня токсичности не произошло, что приводит к сомнению в правильности выбранной характеристики топливоподачи. При многочисленных расчетах форм и выборе углов начала и окончания впрыскивания, выявлено, что ни один из рассмотренных вариантов не привел к заметному снижению токсичности. Для снижения выбросов вредных веществ на данном режиме, принято решение уменьшить количество подаваемого топлива. Для номинального режима работы рассмотрен вариант без предварительного впрыскивания, так как в работе [6] указано, что при подобном уровне оборотов, предварительное впрыскивание не дает видимых результатов. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Из полученных данных видно, что формирование характеристики топливоподачи позволяет снизить количество вредных выбросов на ~15%, сохраняя и даже несколько увеличивая необходимые мощностные показатели. При этом при работе на 1000 об/мин

снижения токсичности не наблюдается, но увеличиваются мощностные показатели двигателя на ~10%.

Таблица 2. Изменение параметров РП с учетом предварительного впрыска

Режим работы	Номинальный, с предвпрыском	Номинальный, без предвпрыска	Частичный	Частичный с уменьшенным расходом топлива
n , об/мин	2300	2300	1000	1000
N_e , кВт	142,5	142,2	39,5	36,4
M_e , Н·м	591,8	590,9	377,2	348,4
α	2,286	2,286	3,812	4,234
P_k	3	3	2,5	2,5
P_z , МПа	17,3	15,3	14,3	14,4
η_e	0,402	0,401	0,418	0,424
η_m	0,84	0,84	0,80	0,80
$G_{тг}$, кг/час	30	30	8	7,2
g_e , г·кВт/ч	210,5	210,8	202,5	199,6
$F_{впр}$	-10	-10	-5	-5
$F_{шп}$	25	25	13	13
NO_x , ppm	253,3	223	93,7	91,4

Анализируя полученные результаты, можно заметить снижение токсичности выхлопных газов на номинальном режиме работы еще на ~13% (суммарно на ~30%), сохраняя мощностные показатели, что подтверждает выводы [6]. На частичном режиме работы, снижая расход топлива, наблюдается небольшое увеличение КПД на 0,6% (суммарно 2,2%), а также снижение токсичности на ~3% (суммарно ~4%).

ВЫВОДЫ:

1. Для различных режимов работы двигателя одинаково сформированные характеристики впрыскивания дают разные результаты по показателям мощности, экономичности и токсичности отработавших газов.

2. При уровне оборотов 80...100% от номинальных предварительный впрыск топлива не дает положительных результатов.

3. В зависимости от преследуемой цели (снижение токсичности/увеличение мощности/сокращение расхода топлива), необходимо использовать индивидуальные формы характеристик топливоподачи, как минимум выделяя группы режимов: близкие к номинальной мощности, частичные, близкие к режиму нормального холостого хода.

ЛИТЕРАТУРА:

1. K. Mathivanan, J.M. Mallikarjuna, A. Ramesh, Influence of Multiple Fuel Injection Strategies on Performance and Combustion Characteristics of a Diesel Fuelled HCCI Engine – An Experimental Investigation, Experimental Thermal and Fluid Science (2016), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016>.
2. Khanh Cung, Abdul Moiz, Jaclyn Johnson, Seong-Young Lee, Chol-Bum Kweon, Alessandro Montanaro. Spray-combustion interaction mechanism of multiple-injection under diesel engine conditions. ScienceDirect, 2014.
3. Системы управления дизельными двигателями. Перевод с немецкого. Первое русское издание. – М.: ООО «Книжное издательство «За рулем», 2004, 480 с.
4. Гальшев Ю.В., Зайцев А.Б., Шабанов А.Ю. Системы и процессы топливоподачи, 2016, 280 с.
5. Гальшев Ю.В., Зайцев А.Б., Сидоров А.А., Шабанов А.Ю. Рабочие процессы и токсичность отработавших газов судовых дизельных и газопоршневых двигателей. Учебно-методическое пособие, 2018.
6. Григорьев А.В., Зайцев А.Б., Гальшев Ю.В. О влиянии характеристики топливоподачи на рабочий процесс дизельного двигателя. Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018г. Институт энергетики и транспортных систем. Часть 1.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ЗАЖИГАНИЯ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА ОБЕДНЕННОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ

На сегодняшний день все большее распространение в качестве топлива на ДВС получает природный газ (метан) ввиду экологических и экономических факторов. При организации работы двигателя на природном газе более выгодным является концепция «бедного горения» (lean-burn methane combustion). Данный подход к организации рабочего процесса позволяет увеличить степень сжатия двигателя, так как при обеднении смеси снижается склонность двигателя к детонации. При осуществлении рабочего процесса в газовом двигателе на обедненной смеси возникает вопрос интенсификации процесса сгорания по причине более низких скоростей окислительных реакций. Для этих целей используют турбулизацию потока с помощью закрутки заряда, а также применяют современные высокоэнергетические системы зажигания, для обеспечения более устойчивого сгорания топлива. Несмотря на более высокие тепловые потери в стенки, связанные с большей степенью турбулентности потока, индикаторный КПД должен быть достаточно высоким [1].

На сегодняшний день установлено, что интенсивность формирования фронта пламени и протекание процесса горения в цилиндре двигателя во многом определяется размерами и скоростью расширения начального очага горения [2]. Искровая система зажигания двигателя предназначена для обеспечения подачи импульсов высокого напряжения на электроды свечи зажигания, синхронизации и распределения этих импульсов по цилиндрам двигателя. От энергии импульса во многом зависят экономичность, устойчивость работы двигателя и экологические показатели двигателя [3].

Целью данной работы была оценка влияния энергии зажигания на рабочий процесс газового двигателя, работающего на обедненной смеси на примере двигателя ЧН 15/17,5. Для этого было проведено математическое моделирование рабочего процесса при различных параметрах зажигания. В процессе моделирования изменялись величины длительности, количество и мощность искрового разряда.

Моделирование проводилось в программном продукте ANSYS Forte. Моделирование процесса распространения пламени производилось с использованием модели основанной на удельной площади поверхности пламени, так называемая G-equation модель. Образование и рост начального очага пламени производилось с использованием модели формирования ядра воспламенения Хервига и Мали [4]. Расчетная область представлена на рисунке 1. Начальные условия приведены в таблице 1.

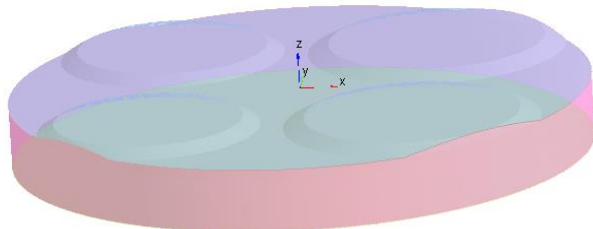


Рис. 1. Расчетная область

Таблица 1. Начальные условия

Начальные условия	
Частота вращения коленчатого вала, об/мин	1900
Давление, бар	2,2
Температура, К	383
Коэффициент избытка воздуха	1,4
Вихревое число	1,1

Для оценки влияния параметров зажигания было проведено моделирование варианта с одноискровым зажиганием длительностью 1 мс и энергией 20 мДж, что соответствует одноискровой конденсаторной системе зажигания [5], и варианта с высокоэнергетической многоискровой системой зажигания длительностью 0,1 мс и энергией 44 мДж с интервалом 0,1 мс [6].

В результате расчетов были получены параметры рабочего процесса. Как видно из рисунка 2 в случае многоискровой системы возросла скорость образования начального очага воспламенения, что привело к увеличению максимального давления сгорания с 10,1 Мпа до 10,6 МПа (рисунок 3), что связано с повышением плотности вводимой энергии по сравнению с одноискровой системой зажигания.

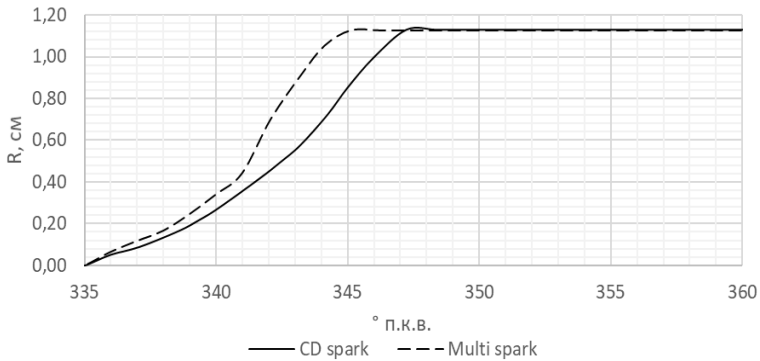


Рис. 2. Зависимость радиуса очага воспламенения

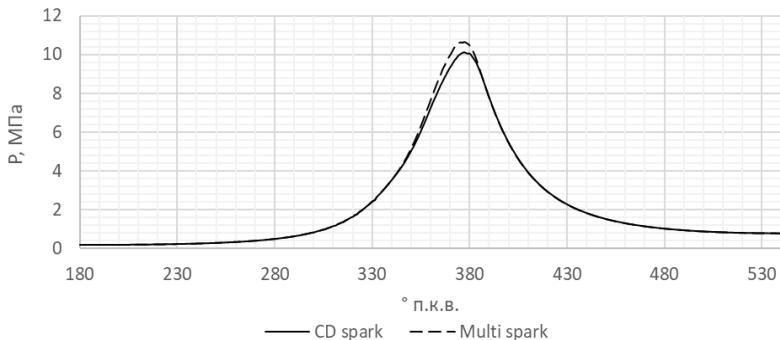


Рис. 3. Индикаторная диаграмма

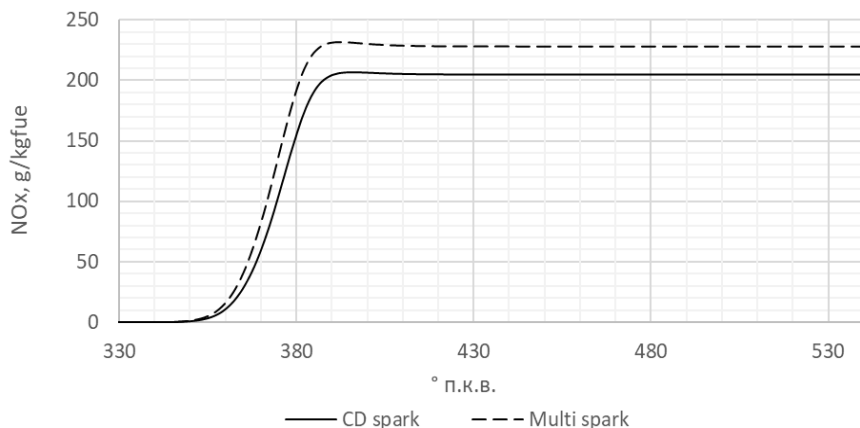


Рис. 4. Концентрация оксидов азота в цилиндре двигателя

Из приведенных результатов можно сделать вывод, что использование высокоэнергетического многоискрового зажигания позволяет интенсифицировать процесс образования начального очага пламени и интенсификации процесса сгорания в двигателе, работающем на обедненной газовой смеси (метан). При этом увеличение максимальной температуры цикла привело к увеличению концентрации оксидов азота, что видно из графиков, представленных на рисунке 4. Из полученных результатов можно сделать вывод, что увеличение плотности вводимой энергии путем использования многоискрового зажигания позволяет интенсифицировать процесс образования начального очага пламени, что в свою очередь позволяет увеличить индикаторный КПД двигателя, но при этом возрастает концентрация окислов азота в отработавших газах.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гайворонский А. И. Обоснование выбора формы камеры сгорания газового двигателя транспортного назначения с учетом вихревого отношения дизельного прототипа / А. И. Гайворонский, Д. А. Савченков // Известия вузов. Машиностроение. – 2008. – №1. – С. 25-37.
2. Францев С. М. Выбор характеристик выделения энергии искрового разряда для системы зажигания // Интернет-журнал Науковедение. 2014. №2 (21). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/vybor-harakteristik-vydeleniya-energii-iskrovogo-razryada-dlya-sistemy-zazhiganiya> (дата обращения: 14.09.2019).
3. Ютт В. Е. Электрооборудование автомобилей: учебник для автомобильных специальностей вузов / В. Е. Ютт. - 3-е изд., стер. - М, 2000. - 287 с.
4. Herweg, R. Maly, R. A Fundamental Model for Flame Kernel Formation in S. I. Engines/ Herweg, R. Maly, R. – SAE Technical Paper 922243.
5. Швыдкий Д. В. Современные системы зажигания для газовых двигателей // Вестник ХНАДУ. 2014. №64.
6. Dongwon Jung An investigation of multiple spark discharge using multi-coil ignition system for improving thermal efficiency of lean SI engine operation / Dongwon Jung, Norimasa Iida // Applied Energy – 2018. – №212. – С. 322-332.

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАБОТЫ АНТИПОМПАЖНОГО КЛАПАНА С ПОМОЩЬЮ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

На месторождениях природного газа газ поступает под относительно низким давлением. Для обеспечения транспорта газа к потребителю используются компрессорные станции. Каждый компрессор оборудован антипомпажным регулирующим клапаном (АПК), который предотвращает работу компрессора на нерасчетных режимах. Большинство клапанов, установленных и эксплуатируемых в настоящее время на компрессорных станциях представляют собой клапаны типа Mokveld [1]. При нормальной работе компрессора регулирующий клапан закрыт, но, как только возникает опасность помпажа, он немедленно открывается, соединяя нагнетание со всасыванием центробежного компрессора. АПК может использоваться для запуска компрессора в режиме кольца или когда возникает необходимость регулировки потока. В случае открытия регулирующего клапана считается, что рассеянная им энергия равна расчетной мощности компрессора. АПК устанавливаются на открытом воздухе, поэтому максимально допустимый уровень шума составляет 85 дБА. Современное оснащение АПК сконструировано таким образом, что в чрезвычайной ситуации он открывается менее чем за две секунды. Система управления способна плавно и точно на той же скорости зафиксировать положение АПК в процессе регулировки. Очевидно, что АПК – важнейший элемент схемы управления газодобычей. Сбои или остановки в работе АПК могут иметь серьезные последствия для работы всей установки, а также для окружающей среды и производственных показателей.

Целью работы является исследование и получение характеристики углового АПК типа Mokveld методами вычислительной газодинамики, учитывая опыт кафедры «Компрессорная, вакуумная и холодильная техника» в этом направлении [2, 3].

Объектом исследования является проточная часть углового АПК типа Mokveld.

Прототип был взят из каталога продукции Арматурного завода [4], учитывая особенности дросселирующей аппаратуры. Был построен эскиз модели проточной части АПК (см. рис. 1), затем с помощью САД систем было построено несколько вариантов 3d моделей с разной степенью открытия для численного эксперимента (см. рис. 2).

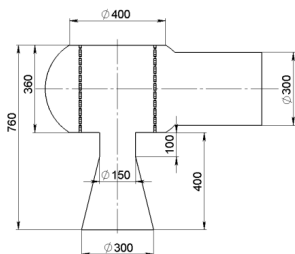


Рис. 1. Эскиз проточной части АПК

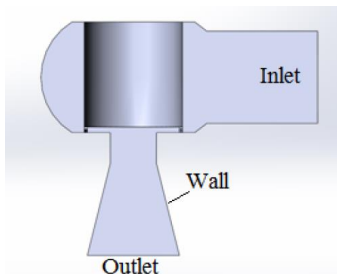


Рис. 2. 3D-модель с 5% степенью открытия

Исследование проводилось с помощью программного пакета Ansys 18.2. Использовались модули: Design modeler – инициализация геометрической модели, ICEM – сеточный генератор, CFX – препроцессор, решатель и обработка результатов. Все

поверхности изначальной геометрии были разбиты на 5 модулей: поверхность входа – Inlet, поверхность выхода – Outlet, поверхность отверстий – Tube и оставшиеся поверхности (конфузор, внешний цилиндр и др.), объединенные в две группы и названные Wall_1 и Wall_2 (см. рис.2)

В ICEM для каждого варианта открытия была построена неструктурированная тетраэдрическая сетка с призматическими слоями. Для всех вариантов максимальный размер ячейки составляет: Tube – 1 мм, Wall_1 – 10 мм, Wall_2 – 5 мм, для Inlet и Outlet использовались глобальные настройки 10 мм и scale-фактор 2. Призматические слои задавались на группе поверхностей Wall_1 и Wall_2 и Tube. Высота первого призматического слоя для Wall_1 и Wall_2 принималась за 0,1 мм, для Tube 0,01 мм. Количество слоев равно 10. Особенность таких клапанов является дросселирование через множество маленьких отверстий (сепаратор), поэтому результат сильно будет зависеть от типа сетки. Пользуясь встроенными инструментами оптимизации расчетной сетки ICEM, а так же указания методической литературы [5] была построена сетка с суммарным количеством элементов около 7млн. Расчет производился для шести вариантов открытия клапана 5%, 15%, 25%, 50%, 75%, 100%, на разных граничных условиях согласно Таблице 1. Количество итераций принималось 500, так как начальное давление не превышало 2 атм. Рабочее тело - Air Ideal Gas, модель турбулентности SST, условие на выходе для всех расчетов - среднее статическое давление равное 1 атм.

Таблица 1. Входные условия

№ режима	$P_{H, \text{атм}}$	T, К
1	1.1	301.24
2	1.2	308.82
3	1.3	315.95
4	1.4	322.73
5	1.5	329.15

По результатам расчетов были построены графики зависимостей массового расхода от степени открытия клапана на 5 разных давлениях (Рис. 3). Были составлены сводные таблицы всех полученных результатов (Таблица 2). Анализ графика показал, что массовый расход увеличивается с процентом открытия, пока не достигает степени открытия 50-60%, а затем начинает уменьшаться. Это связано с тем, что при открытии клапана выше, чем на 50-60%, дросселирование начинает происходить не в отверстиях сепаратора, а в конфузорной части клапана.

Таблица 2 Результаты численного моделирования на 1 расчетном режиме

Открытие, %		m, кг/с	P*, Па	P, Па	T*, К	T, К	p, кг/м3
100	Inlet	2.25	111457	111060	301	300.69	1.29
	Outlet	2.25	106512	100978	301	296.77	1.19
75	Inlet	2.2	111457	111078	301.24	300.95	1.29
	Outlet	2.2	106655	100967	301.24	296.9	1.19
50	Inlet	2.08	111457	111118	301.24	300.98	1.29
	Outlet	2.08	106048	101033	301.24	297.37	1.19
25	Inlet	1.68	111457	111236	301.24	301.07	1.29
	Outlet	1.68	104535	101131	301.24	298.59	1.18
15	Inlet	1.23	111457	111339	301.24	301.15	1.29
	Outlet	1.23	103217	101247	301.24	299.66	1.18
5	Inlet	0.4	111457	111445	301.24	301.23	1.29
	Outlet	0.4	101507	101267	301.24	301.08	1.17

Таким образом, на основании проведенной работы можно сделать следующие выводы, что характеристика антипомпажного клапана нелинейна, функции характеристик клапана при разных давлениях схожи. Это позволяет разработать универсальный полином. Таким образом появится возможность определить по входным параметрам характеристику данного клапана без использования численного моделирования.

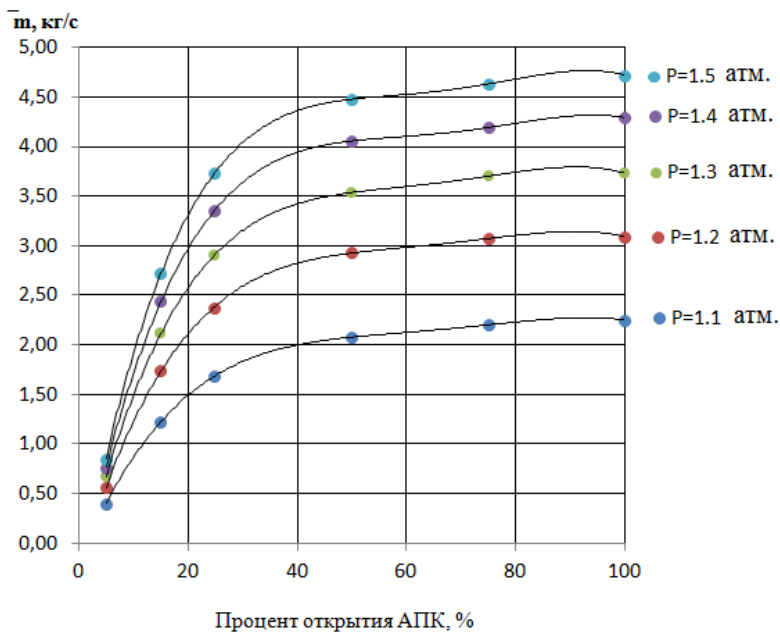


Рис. 3 Зависимость массового расхода от процента открытия клапана

ЛИТЕРАТУРА:

1. Mokveld [Электронный ресурс] 2019. URL: <https://mokveld.com/ru/page/200> (дата обращения 27.09.2019)
2. Лебедев А.А., Кожухов Ю.В. Развитие системы защиты центробежного компрессора от помпажа признаковым способом с использованием вычислительной гидродинамики и анализа сигналов пульсаций давления Газовая промышленность. 2017. № 6 (753). С. 60-68.
3. Измайлов Р.А., Лебедев А.А. Построение системы защиты центробежного компрессора от помпажа на основе анализа сигналов и современных методов численного моделирования газодинамики. Компрессорная техника и пневматика. 2015. № 1. С. 26.
4. Арматурный завод [Электронный ресурс] 2019. URL <http://arm-z.ru/> (дата обращения 27.09.2019)
5. Release 18.0 Documentations for ANSYS. SAS IP, - 2017

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТА РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ПРИРОДНОГО ГАЗА ПО АНАЛИТИЧЕСКОМУ МЕТОДУ РАСЧЕТА И МЕТОДОМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГАЗОДИНАМИКИ CFD

Актуальность: Для развития отраслей российской промышленности, таких как металлургия, энергетика, газовая и химическая и т.д. требуется создание большого количества, различных по своим характеристикам, компрессоров.

Для решения поставленной задачи, научно-техническими центрами и компрессоростроительными предприятиями разработан ряд методик газодинамического проектирования центробежных компрессоров. Зачастую данные методики разрабатываются предприятиями для собственного использования. Данные методики, такие как методика кафедры КВиХТ и методика НЗЛ, решают обратные задачи, то есть по заданному техническому заданию определяются геометрические параметры. Так же существуют методики, основанные на численном (CFD - Computational fluid dynamics) моделировании, которые решают прямую задачу, то есть по известным геометрическим параметрам определяются характеристики компрессора. Каждая методика имеет свои особенности, требующиеся исходные данные, особенности расчета, необходимое для расчета время и погрешности. В настоящее время для решения прямой задачи часто используется метод CFD [1].

Цели и задачи: Целью представленной работы являлся расчет основных геометрических параметров проточной части центробежного компрессора (ЦК) по методике НЗЛ, с дальнейшим решением прямой задачи в программном комплексе Ansys CFX и сравнение полученных данных с проектными на расчетном режиме.

Исходными данными для газо-динамического проектирования являются:

Объёмная производительность, при 20 оС и 0,1013 МПа: м ³ /сутки;	Q = 24 млн.
Производительность массовая, кг/с:	$\dot{m} = 192.22;$
Давление газа начальное, абсолютное, на входе, МПа:	P _н = 5,14;
Давление газа конечное, абсолютное, на выходе, МПа:	P _к = 7,45;
Отношение давлений:	Π = 1,45;
Температура газа на входе, К(°С):	t _н = 288(15);
Плотность газа на входе, отнесенная к 20 °С и 0,1013 МПа, кг/ м ³ :	ρ = 0,692;
Политропный КПД, не менее:	η = 0,83;
Скорость вращения ротора, об/мин:	n = 5300
Сжимаемая среда: природный газ в молярных долях: Метан-98,13%, Этан-0,725%, Пропан-0,22%, Н-Бутан-0,07%, СО ₂ -0,0575%, Азот-0,785%	

В процессе выполнения работы решены следующие задачи:

1. По методике НЗЛ был выполнен расчет проточной части ЦК с определением термо-газодинамических параметров по контрольным сечениям.
2. В программе КОМПАС 3D была создана 3D модель проточной части ЦК и импортирована в модуль Geomtry программного комплекса Ansys.
3. В модуле BladeModeler программного комплекса Ansys были созданы 3D модели рабочих колес.

4. Построены расчетные сетки с количеством ячеек от 400 000 до 1 500 000, в зависимости от сложности модели проточной части.

5. В модуле CFX программного комплекса Ansys в качестве граничных условий были выбраны: полное давление и полная температура на входе задано, массовый расход на выходе.

6. Модель турбулентности SST [2]

7. Произведен CFD расчет, на суперкомпьютере кафедры КВиХТ.

8. Составлены графики (рис. 1 и рис. 2) для сравнения полученных данных.

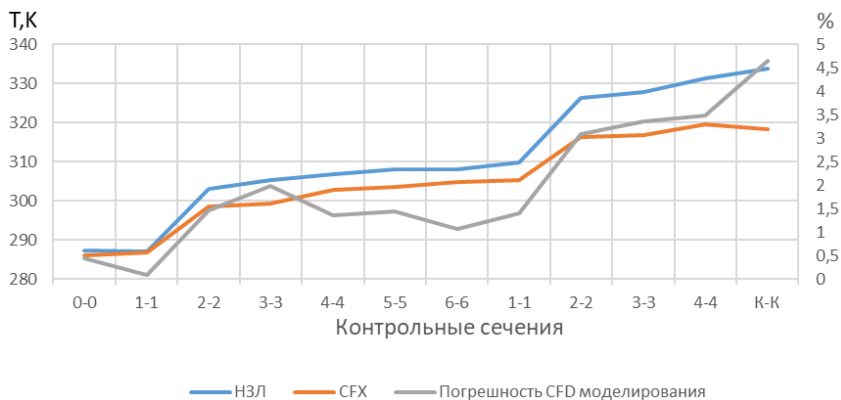


Рис. 1 – Статическая температура

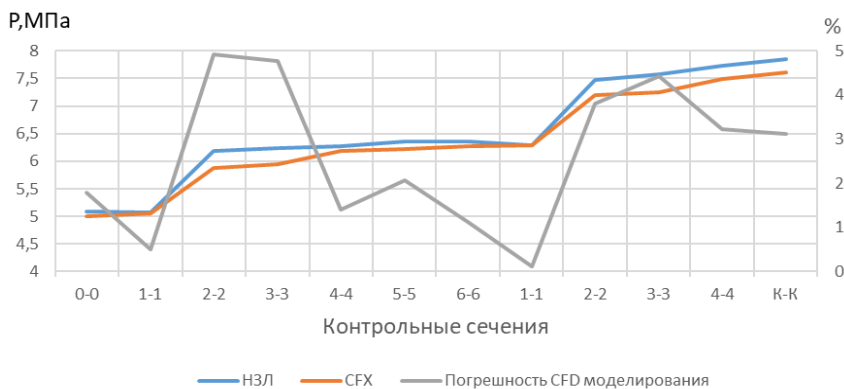


Рис. 2 – Статическое давление

Вывод: Как видно из полученных данных максимальное расхождение по статическому давлению, равное 4,917% было получено в сечении 2-2 первой ступени, минимальное расхождение равное 0,114% в сечении 1-1 второй ступени, а по статической температуре максимальное расхождение равное 4,65% было получено в сечении 8-8, минимальное расхождение равное 0,09% было получено в сечении 1-1 первой ступени, что можно считать приемлемым. Среднее расхождение по температуре составило 1,985%, а по давлению

2,606%. В представленной работе видно, что хоть метод НЗЛ и позволяет в относительно короткие сроки произвести расчет и проектирование проточной части ЦК, но при этом данные расчётов отличаются от расчётов методом CFD. Узнать истинные значения параметров в контрольных сечениях проточной части мы можем, только корректно проведя натурные испытания [3].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ю.Б. Галеркин, Ю.В. Кожухов. Теория турбомашин. Основы теории турбокомпрессоров: учебное пособие- СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2013- 245с
2. Данилишин А.М., Кожухов Ю.В. Анализ влияния на характеристики центробежной компрессорной ступени параметров модели AnsysCFX. Неделя науки СПбПУ: материалы научно-практической конференции с международным участием. ИЭиТС СПбПУ. Ч.2-СПб: Изд-во Политехн. ун-та 2014. - 228с.
3. A. A. Aksenov, A. M. Danilishin, A. M. Dubenko and Y. V. Kozhukov. Development of the virtual experimental bench on the basis of modernized research centrifugal compressor stage test unit with the 3D impeller. 2017 IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 232 012042. September 2017. DOI: 10.1088/1757-899X/232/1/012042.

УДК 658.26

Е.И. Рыбин, В.А. Соболев, А.А. Лебедев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

КОМБИНИРОВАННАЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА С КОМПРЕССОРНЫМ НАДУВОМ

Введение. В настоящее время во многих отраслях промышленности существует потребность в приводном оборудовании мощностью не более 3 МВт. Количество таких агрегатов на сырьевом рынке ограничено. Энергетические машины с данными параметрами можно будет использовать не только в нефтегазовой сфере, но и в судостроительной, пищевой и металлообрабатывающей. Требования к таким установкам – минимальная масса и габариты, желательно блочное и моноблочное исполнение, с массой одного блока не более 6000-7000 килограммов, возможность работать при низких температурах, фильтрация от пыли. Перспективным направлением в создании таких агрегатов является применение комбинированных схем, в которых сжатие воздуха происходит сначала в компрессоре (в центробежном или винтовом масло-заполненном), а затем в дожимающем поршневом или свободнопоршневом компрессоре до требуемого конечного давления. Еще одним вариантом является использование свободнопоршневых машин, работающих в комбинированном режиме, с непосредственным приводом дожимающего компрессора и газотурбинным приводом центробежного компрессора.

Целью работы является проектирование и расчет комбинированной энергетической установки с компрессорным наддувом – свободно поршневого генератора газа (СПГГ).

Принципиальной моделью энергетической машины является комбинированная схема, в состав которой входит СПГГ в совокупности с газотурбинной установкой (ГТУ) (рис.1). На этом рисунке буквами «К» обозначена компрессорная полость, «КС» - камера сгорания, «СПГГ» - свободно поршневой генератор газа, «РС» - ресивер, «ГТУ» - газотурбинная установка.

Прототипом данного агрегата является СПГГ, производимая в 1920-1930-ые годы для тракторов компании «Форд». Также подобные двигатели применялись ещё в начале 1960-х годов на танках «Чифтен», разработанных фирмой «Лейланд». Среди ряда нововведений

англичан - применение именно двухтактного дизеля с оппозитным расположением поршней (рис.1). После долгих попыток преодолеть конструктивные недостатки, присущие английскому мотору, в Советском Союзе родился оппозитный турбодизель 5ТДФ [1].

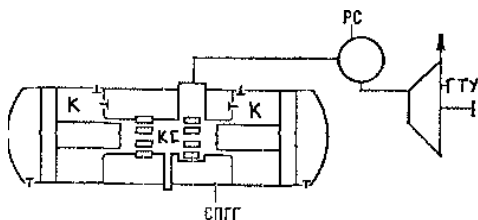


Рис. 1. Комбинированная схема СППГ и ГТУ

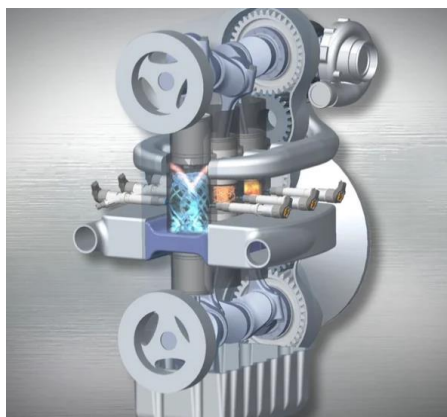


Рис. 2. Свободнопоршневой двигатель внутреннего сгорания

Схему расположения поршней в свободно поршневом генераторе газа выбираем оппозитную. Эта схема наиболее устойчивая за счет симметрично расположенных под углом 180° поршней, уравнивающих друг друга. Для уменьшения массы и габаритов конструкции откажемся от присущего двигателям внутреннего сгорания (ДВС) коленчатого вала и заменим его шестернями (рис. 2). Синхронизация поршней в СППГ будет происходить путем зубчатого зацепления шестеренок. Движение поршням будет передаваться за счет энергии сгорания природного в камере сгорания (КС). Применение газа как источника сгорания в КС обусловлено его более оптимальным коэффициентом полезного действия (КПД), так как КПД двигателей на природном газе находится по характеристикам между бензиновым и дизельным двигателями [2]. Также газовое сгорание наиболее экологичное. В проектируемой установке не предусмотрен мультипликатор, так как газ напрямую поступает в ГТУ. Данный фактор упрощает конструкцию, уменьшает ее массу и габариты, а также говорит об отсутствии смазочных элементов. Ни один двигатель не может поспорить с СППГ, работающим в паре с газовой турбиной, так как КПД такой комбинации может достигать 40%! Чтобы оценить эту цифру, достаточно сравнить ее с величиной КПД обычной паротурбинной установки — 20—25%, газотурбинной установки — 25 — 26%, бензинового мотора — 28—30%, лучших дизелей — 32—35% [3].

Принципиальный режим работы СПГГ (рис.3) заключается в следующем: дифференциальные поршни (ДП) 6 (дизеля и компрессора) разводят в стороны и устанавливаются в пусковое положение. В цилиндр компрессора 5 подается пусковой воздух, который поступает в полость всасывания компрессора 2 через всасывающий патрубок 1. Под воздействием давления воздуха поршни передвигаются к цилиндру агрегата, в этот момент продувочные 9 и выхлопные 12 окна перекрываются. Оставшийся в цилиндре двигателя 10 воздух сжимается, а температура его повышается. При движении поршней к верхней (правой) мертвой точке через форсунку 11 впрыскивается топливо, и топливно-воздушная смесь самовоспламеняется. Далее поршни останавливаются. В цилиндре двигателя образуются продукты сгорания с высоким давлением, которое, действуя на поршни, сообщает им кинетическую энергию движения в направлении к крышкам компрессора. При ходе поршней к центру машины в компрессоре происходит всасывание воздуха через всасывающие клапаны 4, а в продувочном насосе 3 – сжатие и нагнетание воздуха через нагнетательные клапаны 15 в ресивер 8. При перемещении ДП к крышкам компрессора в двигателе происходит расширение продуктов сгорания, а продувочные и выхлопные окна открываются, через них продукты горения выбрасываются в выхлопную трубу 13. Затем цилиндр наполняется свежим зарядом воздуха. В компрессоре в этот момент воздух сжимается и нагнетается через клапаны 7 в ресивер (нагнетательный коллектор) 16 и далее к уходит потребителю. В продувочном насосе осуществляется всасывание через клапаны 14. Оставшийся воздух в мертвых пространствах компрессора после остановки поршней нижних (крайних) мертвых точках расширяется и заставляет поршни двигаться к центру машины.

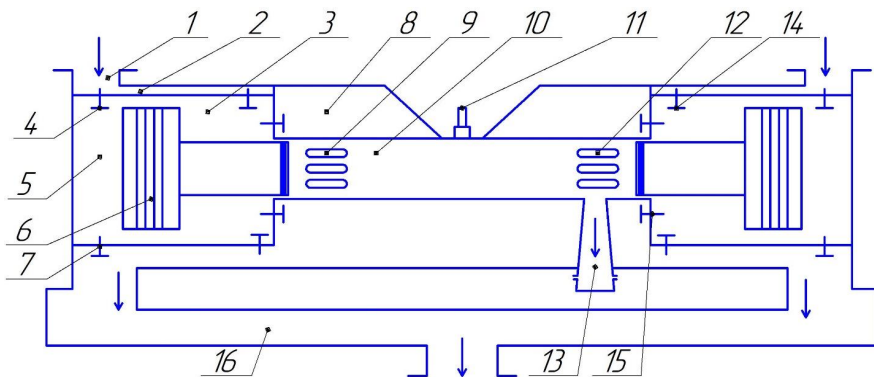


Рис. 3. Общая схема одноступенчатого свободнопоршневого компрессора

Дальнейшим этапом был расчет данного агрегата, некоторые из его параметров приведены в таблице 1.

Таблица 1. Полученные результаты расчета агрегата.

Давление всасывания, $p_{вс}$ (кг/см ²)	0,93
Давление нагнетания, $p_{н}$ (кг/см ²)	9
Отношение давлений в компрессоре, $\Pi_{к}$	9,68
Диаметр поршня компрессора, $D_{к}$ (мм)	850

В результате проектирования и расчета комбинированной схемы СПГГ и ГТУ можно сделать следующие выводы:

1. Степень отношения давления данного компрессора составляет 9.68, что является высоким показателем для такого рода машин.

2. Геометрические размеры поршня агрегата позволят нам создать достаточно компактный силовой привод, что повлечет к снижению металлоемкости.

3. За счет изъятия из конструкции сложных механизмов (коленчатый вал) и выбора наиболее пригодной схемы расположения поршней энергетическая машина будет проста в обслуживании.

4. При прямой связи СПГГ с ГТУ появится возможность быстрого пуска установки.

5. При использовании такого вида энергетических машин возможное увеличение мощности при увеличении количества СПГГ в комбинированной схеме.

ЛИТЕРАТУРА:

1. П.А. Шелест. "Комбинированные турбопоршневые двигатели.", МАШГИЗ, Москва, 1958.
2. А.М. Бруданов Анализ применения природного газа в качестве моторного топлива на дорожно-строительных и коммунальных машинах.
3. Ф.М. Елистратов, В.М. Колоко, М.С. Томили. "Силовые установки со свободнопоршневыми генераторами газа", СУДПРОМГИЗ, Ленинград, 1959.

УДК 621.514

А.Д. Семенов, А.Р. Чубук, А.А. Лебедев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МНОГОСТУПЕНЧАТОЙ КОМПРЕССОРНОЙ УСТАНОВКИ ВНЕШНЕГО СЖАТИЯ

Объектом исследования в данной работе является машина внешнего сжатия. Данная проблема находится на стадии теоретической разработки и предварительных расчетов, а также, анализа полученных результатов.

Предметом исследования данной работы является методика проектирования компрессора с внешним сжатием.

Актуальность. Отличительными преимуществами компрессоров внешнего сжатия (воздуходувок) в сравнении с другими типами компрессоров являются безусловная надежность конструкции, обусловленная отсутствием трений и масла, сравнительно низкая производственная стоимость и низкие эксплуатационные затраты, компактность агрегата, высокая износостойкость и отсутствие большого количества соприкасающихся элементов, что делает период эксплуатации довольно длительным и ограничивающимся исключительно ресурсом шестерней, и конечно, низкая чувствительность к составу рабочей среды, что делает возможной работу с так называемыми «грязными» газами, взрывоопасными и агрессивными веществами. Таким образом, спектр применения данного вида компрессорных установок достаточен, чтобы говорить о значимости воздуходувок типа Рутс в эпоху винтовых и поршневых компрессоров. Именно поэтому данная методика и расчет, разрабатываемые кафедрой «КВиХТ», являются новаторскими в данной области и расширяют диапазон ее дальнейшего практического применения.

Целью данной работы является проведение математического расчета компрессора внешнего сжатия.

Задачи. В процессе проведения необходимых расчетов и анализа данных будут решены такие задачи, как: Создание двумерной геометрии в Компас-3Д, Создание трехмерной

модели в Компас-3D, Создание расчетной сетки в Ansys, Итерационный расчет и моделирование процесса сжатия в Ansys, Создание наглядной картины изменения параметров рабочей среды в Ansys, Анализ полученных данных по результатам расчета.

Исходными данными являются: Давление на всасывании $P_n=1$ МПа, Давление на нагнетании $P_v=1.4$ МПа, Температура на всасывании $T_n=298$ К, Скорость вращения ротора 3000, Рабочая среда - воздух.

Результаты работы:

На первом этапе создается двумерная модель лопаток, учитывая угол поворота относительно друг друга, а также межосевое расстояние (Рис.1). На основе двумерной модели создается трехмерная модель каждой лопатки и проточной части (Рис. 2 и 3) [1].

Для получения более точных результатов в зазоре между лопаткой и корпусом, в сетке проточной части создаем более точную сетку в пограничном слое (Рис. 4) [2]. Далее создается расчетная сетка лопаток (Рис. 5).

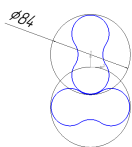


Рис.1. Эскиз профиля лопаток

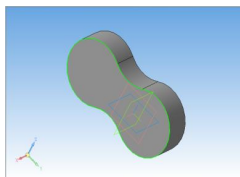


Рис.2. Трехмерная модель лопатки

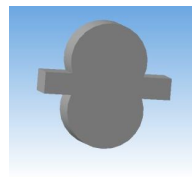


Рис.3. Трехмерная модель корпуса

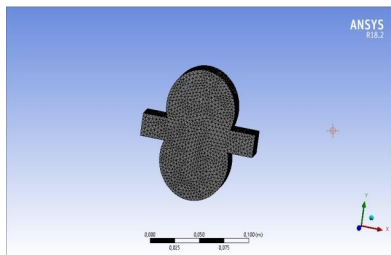


Рис.4. Расчетная сетка корпуса

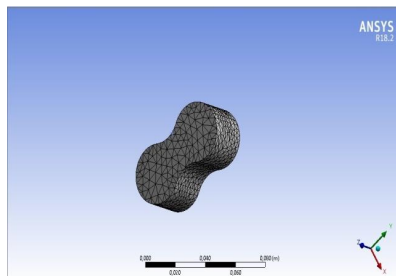


Рис.5. Расчетная сетка лопатки

На следующем этапе задаются граничные условия и модель процесса с помощью инструмента Ansys CFX [3]. На рисунке 6, 7 и 8 представлены несколько вариаций математического расчета в CFX.Solution с минимальными отклонениями в исходных данных для получения оптимальных результатов.

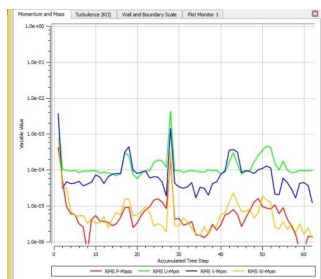


Рис. 6. График 1 расчета

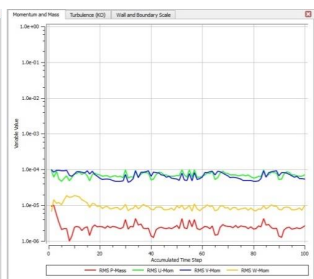


Рис. 7. График 2 расчета

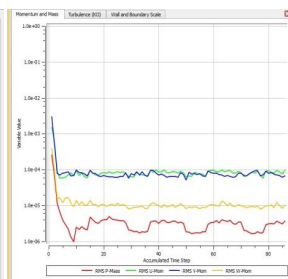


Рис. 8. График 3 расчета

Для наглядного изображения результатов расчета, с помощью инструмента CFX.Results, создается картина изменения давлений (Рис.9 и 10) [4].

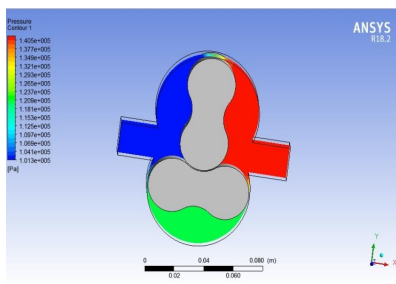


Рис.9. Изменение давления

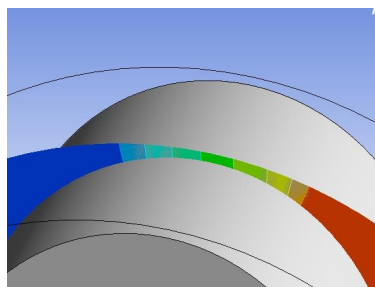


Рис.10. Перетечки в зазоре

Анализ полученных данных. Целью данной работы являлся расчет компрессора с внешним сжатием. В ходе выполнения данной работы были проведены в инженерно-математическом пакете программ Ansys. В результате анализа полученных расчетных данных было установлено, что теоретическое воплощение данной методики, разработанной кафедрой «КВиХТ» также не находит противоречий относительно физической и теоретической сути компрессорных технологий. По результатам проведенной работы можно сделать вывод, что цель и задачи, определенные в начале исследования были достигнуты и выполнены в полном объеме. Однако, дальнейшее использование и применение методик, включающих в себя многоступенчатое внешнее сжатие, требует более тщательного расчета многоступенчатой установки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. <https://kompas.ru/publications/video>
2. Данилишин А.М., Кожухов Ю.В. Разработка параметрической модели проточной части двухступенной ступени с осесредним рабочим колесом центробежного компрессора. Журнал «Территория нефтегаз», 2019. С. 12-19.
3. Яблоков А.М., Садовский Н.И., Кожухов Ю.В. Моделирование течения вязкого газа в модельных малорасходных ступенях центробежного компрессора. Журнал «Территория нефтегаз», 2019. С. 28-35.
4. <https://www.cadferm-cis.ru>

ПРОЕКТНЫЙ РАСЧЕТ И АНАЛИЗ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ЗАВОДА ПО СЖИЖЕНИЮ
ПРИРОДНОГО ГАЗА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬЮ 2000 ТЫС. Т. В ГОД

Актуальность. По всему миру сжиженный природный газ (СПГ) используется в различных отраслях промышленности, науки и техники: в системе транспорта, распределения и хранения; в качестве энергоносителя или источника холода; в химии, металлургии, нефтяной и газовой промышленности. С развитием технологий сжижения, хранения и транспортировки ПГ значимость проектов СПГ возрастает, вопросы сжижения газа актуальны и их решения требуют в каждом конкретном случае индивидуального подхода [1].

Цели и задачи. Целью исследования является проектный расчет завода для СПГ для цикла среднего давления (50 атм) производительностью не менее 2000 тыс.т. СПГ в год, температура газа на входе в установку 30°C.

Задачи исследования:

- Выбрать схему сжижения, рассчитать параметры газа в узловых точках, на основе расчета и заданных параметров подобрать оборудование для завода;
- Проанализировать технико-экономические показатели завода: компоновка, особенности конструкции установок, габариты и площадь, занимаемую установками, потребление энергии, производительность;
- Сделать вывод об экономической эффективности проекта.

В настоящее время существует множество видов заводов по сжижению природного газа. По производительности по СПГ заводы разделяются на:

1. Малотоннажные («мини-заводы СПГ») – до 1 млн т СПГ в год.
2. Среднетоннажные (средние заводы СПГ) – от 1 до 2 млн т СПГ в год.
3. Крупнотоннажные (крупные заводы СПГ) – более 2 млн т СПГ в год.

Мини-заводы обеспечивают относительную гибкость и скорость реализации проектов, но используют простые малоэффективные технологии. Крупнотоннажные заводы позволяют реализовывать значительные запасы газа с получением прибыли, но используют сложные технологии сжижения. Средний завод – это гибкость в производстве и сокращенные сроки реализации при относительно небольших капитальных затратах.

Рассмотрим установку СПГ на детандерном цикле, одном из распространенных циклов сжижения. На рисунке 1 изображена принципиальная схема установки СПГ, работающей по детандерному циклу среднего давления с расширением в детандере части охлажденного газа; давление 50 атм, температура газа 30°C. Требования по выходу СПГ 63 кг/сек. Состав газа: CH_4 (94,2%); C_2H_6 (2,5%); C_3H_8 (0,38%); C_4H_{10} (0,24%); N_2 (2,6%); CO_2 (0,13%).

Принцип работы установки. Газ отбирается из магистрального газопровода МГ и охлаждается в теплообменнике ТО1; поток разделяется: часть газа расширяется в детандере ТД, а часть последовательно охлаждается в ТО2 и в ТО3, затем поток дросселируется в дросселе ДВ от 50 до 6 атм в отделитель жидкости ОЖ, ожиженная часть газа (х) направляется в сосуд для СПГ. Неожигенная часть газа выходит из ОЖ и проходит через ТО3. Расширенный в ТД поток смешивается с обратным потоком газа из ТО3, далее этот обратный поток проходит последовательно через ТО2 и ТО1 и сжимается в компрессоре ТК от 6 до 50 атм. Поскольку в холодильном цикле «ушло» (х) газа в жидком виде, то новый поток формируется потоком газа из компрессора и пополнением доли сжиженного газа из МГ [2]. Поток газа поступает на вход в установку. Цикл замыкается.

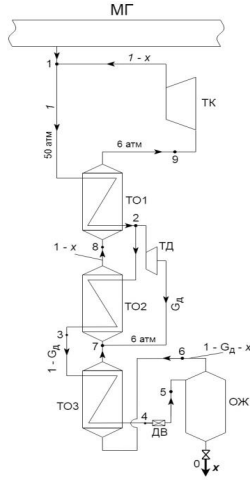


Рис.1 Принципиальная схема установки СПГ на детандерном цикле среднего давления

Определяем количественные значения x и G_d путем решения системы уравнений методом последовательных приближений [3]:

$$\eta_{\text{ад}} = \frac{i_9 - i_{6s}}{i_2 - i_{6s}} - \text{изоэнтروпный КПД детандера;}$$

$$G_d = \frac{(i_7 - i_9) - (i_9 - i_2) + x \cdot (i_9 - i_7) + q_c^I}{(i_2 - i_7) + (i_7 - i_9)}; \quad x = \frac{(1 - G_d) \cdot (i_7 - i_9) - q_c^{II}}{i_7 - i_9} - \text{уравнения энергетического баланса;}$$

где i_n – энтальпии газа в соответствующих точках схемы; i_{6s} – энтальпия газа при адиабатическом расширении в детандере; G_d – расход газа через детандер (в долях); x – выход жидкого ПГ (в долях); q_c^I ; q_c^{II} – удельные теплопритоки извне;

При расчете цикла учитываем условия:

1. Соблюдение тепловых балансов горячего и холодного теплоносителей в теплообменниках [3]:

$$Q = G_1 \cdot (i'_1 - i''_1) = G_2 \cdot (i'_2 - i''_2),$$

где Q - количество теплоты, передаваемое через поверхность теплообмена;

i'_1, i'_2, i''_1, i''_2 , - начальная и конечная энтальпии горячего (1) (прямой поток ПГ при 5 МПа) и холодного (2) (обратный поток ПГ при 0,6 МПа) теплоносителей. G_1 и G_2 - массовый расход горячего и холодного теплоносителей соответственно;

2. Температура газа за детандером ТД и на выходе из теплообменника ТО2 одна и та же и равна T_6 [1].

3. КПД детандера $\eta = 0.65$.

4. Количественные значения теплопритоков $q_c^I = 4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$; $q_c^{II} = 2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Результаты расчета рассмотренного цикла приведены в таблице 1.

При подборе оборудования получили цех, состоящий из 26 параллельно работающих установок СПГ. Состав: компрессорная установка 4ГЦ2-130/6-65, детандергенераторный агрегат ДГА-10, три теплообменника кожухотрубчатых, трубопроводная, регулирующая и запорная арматура, вспомогательное оборудование и система управления и автоматизации.

Ориентировочно площадь цеха сжижения составит 2500 м². Потребление энергии составляет примерно 164000 кВт на весь цех.

Таблица 1. Результаты расчета детандерного цикла установки СПГ, работающей по циклу среднего давления

№	Параметр	1	2	3	4	5	6	0	7	6S	8	9
1	p, атм	50	50	50	50	6	6	6	6	6	6	6
2	T, К	303	283	216	213	164	170	164	195,5	171	266	303
3	t, °С	30	10	-57	-60	-109	-103	-109	-77,5	-102	-7	30
4	i, кДж/кг	557,5	507	312	297	297	320	307	375	302	522	604
5	s, кДж/кг*К	9,12	8,92	8,15	8,09	8,91	9,05	8,98	9,35	8,92	9,99	10,3

На рис.2 представлена диаграмма детандерного цикла сжижения среднего давления в координатах S-T.

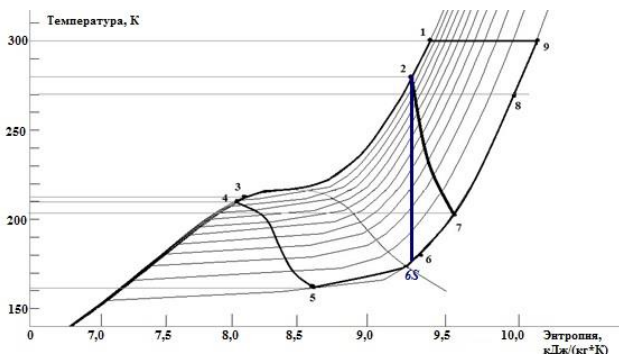


Рис.2 Детандерный цикл среднего давления в S – T диаграмме

Результаты. Применение средних установок СПГ экономически более выгодно для производства СПГ в средних количествах. Проработка проектов сжижения требует индивидуальной проработки и учета внешних факторов.

ЛИТЕРАТУРА:

- Danilishin, A.M., Kartashov, S.V., Kozhukhov, Y.V., Kozin, E.G. The methodology for the existing complex pneumatic systems efficiency increase with the use of mathematical modeling. (2017) IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 232 (1), статья № 012069. DOI: 10.1088/1757-899X/232/1/012069. pp. 2-3.
- Aksenov, A., Kozhukhov, Y., Sokolov, M., Simonov, A. Analysis and modernization of real gas thermodynamic calculation for turbocompressors and detander units. (2018) MATEC Web of Conferences, 245, статья № 09005. DOI: 10.1051/mateconf/201824509005. p. 2.
- Соколов М.И., Чернышев М.С., Назаренко Н.А., Аксенов А.А. Анализ и модернизация программы термодинамического расчета реального газа на базе модифицированных уравнений Бенедикта-Вебба-Рубина. В сборнике: НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ. материалы научной конференции с международным участием. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. 2017. С. 199-201.

ОПТИМИЗАЦИЯ ГЕОМЕТРИИ ОБРАТНОГО НАПРАВЛЯЮЩЕГО АППАРАТА
МАЛОРАСХОДНЫХ СТУПЕНЕЙ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Актуальность. Центробежные компрессоры находят применение во многих областях промышленности и энергетики, в частности широко используются в нефтегазовой отрасли. Следовательно, снижения затрат на работу центробежных компрессоров является актуальной задачей. При этом повышение эффективности центробежных компрессоров зависит как от совершенствования рабочих колес, так и статорных элементов проточной части. Так как уменьшение потерь на статорных элементах может значительно повысить эффективность ступени центробежного компрессора в целом [1, 2]. Особенно уменьшение потерь и повышение энергоэффективности актуально для получения высокого давления для добычи и транспортировки газа на большие расстояния, а также для получения сжиженного природного газа (СПГ). Например, давление газа в подводных газопроводах начальное давление более 200 атмосфер. Для получения таких высоких давлений нужны центробежные компрессоры с наименьшей потерей давления газа в стационарных элементах проточной части, в особенности в поворотном колене и обратном направляющем аппарате (ОНА) [3].

Цель работы. Для снижения потерь в обратном направляющем аппарате необходимо получить оптимальную форму его геометрии. В данной работе была проведена оптимизация ОНА центробежного компрессора лабораторного стенда. Модель была построена в программном комплексе ANSYS на основе данных геометрии ступени компрессора. Была проведена верификация расчетов, полученных численными методами, с данными лабораторных экспериментов. На рисунке 1 представлена параметрическая модель геометрии ОНА с поворотным коленом и лопатками.

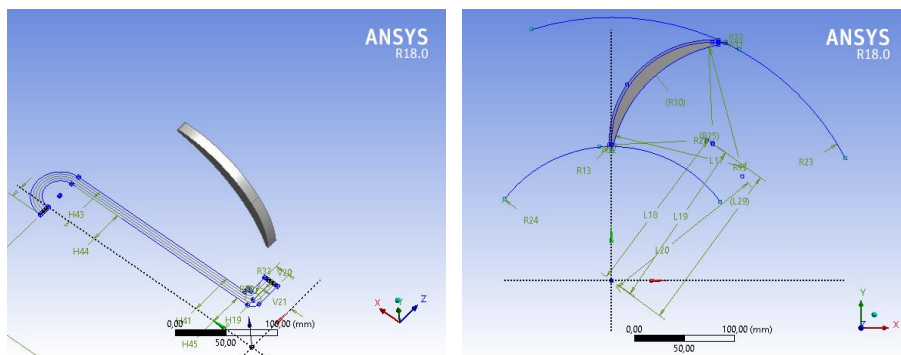


Рис. 1. Параметрическая модель геометрии ОНА с поворотным коленом и лопатками

Расчеты проводились на 6 режимах с разной производительностью. Угол потока на входе в поворотное колено в расчетах задавался на основе экспериментальных данных. Для проведения оптимизации менялись следующие параметры геометрии ОНА: число лопаток, форма лопатки, ширина канала на входе и выходе из ОНА, радиус скругления поворота на выходе из ОНА. По результатам каждого численного расчета определялся коэффициент

потерь. На рисунках 2 и 3 представлены эпюры распределения полного давления в ОНА и линии тока на одном из расчетных режимов.

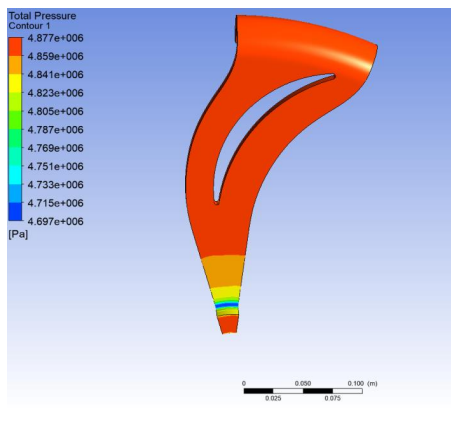


Рис. 2. Эпюра распределения полного давления

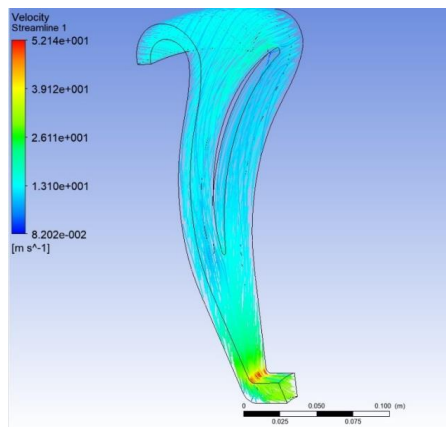


Рис. 3. Линии тока в ОНА

Выводы. После проведенных расчетов и анализа зависимостей коэффициента потерь от параметров формы геометрии были определены оптимальные значения рассматриваемых параметров геометрии ОНА. Выявлено оптимальное число лопаток для данного ОНА, равное 15 лопаткам. Найден оптимальный размер радиуса скругления на выходе из аппарата. Также ширина канала на входе была уменьшена на 2.25 мм и увеличена на выходе на 3 мм, в итоге оптимизированный ОНА принял конфузорную форму. В результате совмещения всех изменений геометрии коэффициент потерь оптимизированного ОНА был снижен на 9,1% по сравнению с обратным направляющим аппаратом, стоящим на ступени экспериментального стенда.

ЛИТЕРАТУРА:

1. De Bellis F., Guidotti E., Rubino D. T. Centrifugal Compressors Return Channel Optimization by Means of Advanced 3D CFD //ASME Turbo Expo 2015: Turbine Technical Conference and Exposition. – American Society of Mechanical Engineers, 2015. – С. 1-9.9.
2. Морев П.М., Садовский Н.И., Данилишин А.М., Малев К.Г., Кожухов Ю.В. Оценка изменения эффективности обратного направляющего аппарата при изменении числа лопаток при численном моделировании в программе Ansys. В сборнике: Неделя науки СПбПУ. Материалы научного форума с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. 2015. С. 238-240.
3. Кухаренко В.Ф., Янин И.С., Веселов А.Н., Анализ проектирования и разработка параметрической трехмерной модели обратного направляющего аппарата центробежного компрессора. Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием, 19-24 ноября 2018 г. Институт энергетики и транспортных систем. Ч.1. – СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2018. – 277с. с.209-211.

АНАЛИЗ РАСЧЕТА ВЯЗКОГО ТРЕХМЕРНОГО ПОТОКА В ЛАБИРИНТНОМ
УПЛОТНЕНИИ У ОСНОВНОГО ДИСКА ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА

Актуальность. Утечки и протечки газа являются причинами потери энергии. Перетечки через покрывающий диск повторно сжимаются в рабочем колесе, а утечки — безвозвратно попадают в атмосферу или на всасывание компрессора в зависимости от конструкции. Перетечки через основной диск являются причиной дополнительных потерь трения дисков и потерь энергии за счет неподвижных элементов ступени. Уменьшение потерь достигается применением лабиринтных уплотнений [1, 2]. В данной работе рассматривается лабиринтное уплотнение у основного диска ступени промежуточного типа центробежного компрессора.

Цели и задачи. Целью работы является исследование течения вязкого трёхмерного потока в различных конструкциях лабиринтных уплотнений у основного диска центробежного компрессора методами численного моделирования, определение коэффициента расхода лабиринтного уплотнения для каждого из вариантов, с последующим выбором оптимального варианта исполнения уплотнения.

Расчет трёх типов уплотнений (рис.1), взят сектор 24° , проведен на 6-ти режимах с заданными параметрами на входе в проточную часть лабиринтного уплотнения, исходные данные представлены в таблице 1.

Математическая модель задана в следующих граничных условиях:

Режим турбулентности	Medium (Intensity=5%)
Модель турбулентности	SST
Рабочее тело	Air ideal gas
Heat Transfer	Total energy
Rotation frequency, n, rev/min	n = 10569.6 rev/min
Flow regime	Subsonic

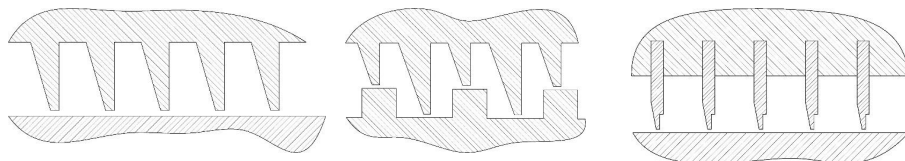


Рис.1. Первый, второй и третий типы лабиринтных уплотнений

Таблица 1. Исходные параметры для расчета

	P^* , Па	P , Па	T^* , К
1 Режим	152855	152598	344,388
2 Режим	151843	151589	342,397
3 Режим	150098	149856	340,602
4 Режим	147914	147638	338,699
5 Режим	145004	144746	337,167
6 Режим	138303	138085	333,527

Результаты работы. В результате работы было смоделировано и рассчитано три типа лабиринтных уплотнений основного диска рабочего колеса ЦК на шести режимах, результат расчёта третьего типа ЛУ методом численного моделирования представлен Рис.2. по методике [3]. Построена блочно-структурированная сетка в модуле ICEM, количество элементов: 1260558 с первичной минимальной толщиной пристеночного слоя 0.0005 мм. Обработаны результаты, полученные методом численного моделирования в программном комплексе ANSYS CFX [4], результаты обработки данных представлены на Рис.3.

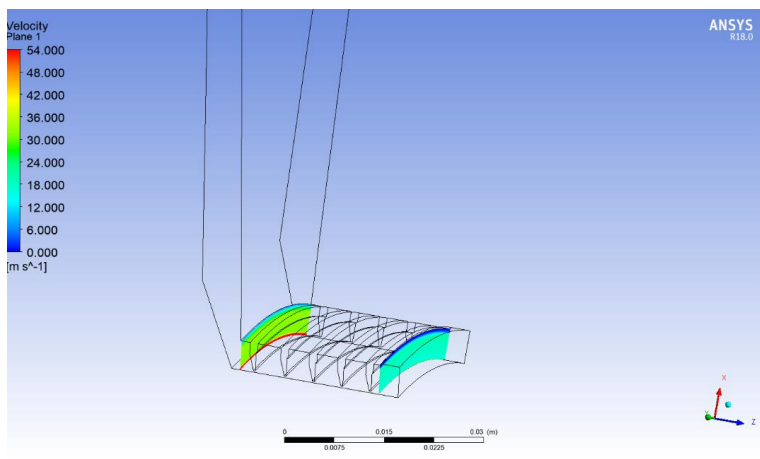


Рис.2. Результаты расчёта проточной части лабиринтного уплотнения третьего типа

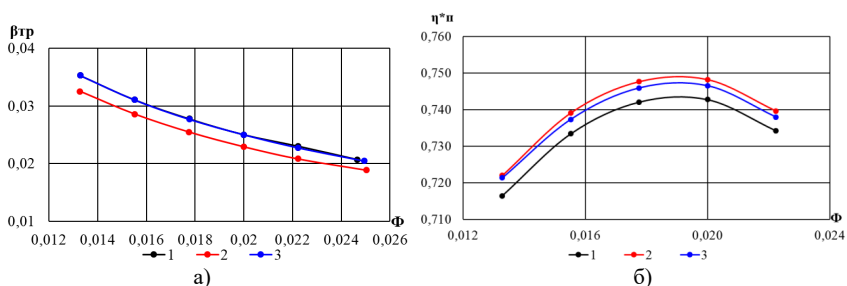


Рис.3. Графики зависимости от условного к-та массового расхода: а) к-та трения; б) политрпного КПД по полным параметрам в тестовой ступени.

Вывод. На основании анализа представленных графиков делаем вывод что первый тип уплотнений является наихудшим по всем параметрам, за исключением коэффициента трения, который является наименьшим среди всех типов уплотнений, но в сумме с коэффициентом протечек показывает наибольшие значения. Данный тип показал низший политрпный коэффициент полезного действия по полным параметрам, а также наибольший суммарный коэффициент трения и протечек. Второй тип уплотнения показал наилучшие характеристики, как по значению политрпного коэффициента полезного действия по

полным параметрам в тестовой ступени, так и по суммарному коэффициенту трения и протечек. Третий тип уплотнений несколько уступает второму по аналогичным показателям.

Таким образом, мы выбираем второй тип уплотнений, т.к. он имеет наилучшие показатели, значение которых имеет существенное влияние на общие показатели центробежного компрессора.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Селезнев К.П., Галеркин Ю.Б. Центробежные компрессоры. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1982. 271 с.
2. Самойлович Г.С. Гидрогазодинамика: Учебник для студентов вузов, обучающихся по специальности «Турбостроение», 1990. 16-26 с., 361-367 с.
3. Ю.В. Кожухов, А.М. Данилишин, А.А. Лебедев Моделирование рабочего процесса в неподвижных элементах центробежных компрессоров методами вычислительной газодинамики. СПб.: Издательство Политехнического университета, 2015.
4. ANSYS Inc., ANSYS CFX 18.0 "Users Manual", 2018.

УДК 62-121: 62-987

И.С. Толокнова, А.А. Лебедев

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОЦЕНОЧНЫЙ ВЫБОР НАИБОЛЕЕ ПОДХОДЯЩЕГО МАТЕРИАЛА МЕМБРАНЫ ДЛЯ МЕМБРАННОГО КОМПРЕССОРА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Актуальность. В настоящее время область применения мембранных компрессоров недостаточно широка, но они незаменимы в тех областях промышленности (наполнение газовых баллонов высокого давления), медицины (аппараты искусственной вентиляции легких – ИВЛ), энергетики (атомная промышленность), электроники (газы для электроники, такие как силан), где требуется высокая чистота газа и высокое давление при малом количестве ступеней компримирования. Проблема непопулярности мембранных компрессоров в современном мире связана со значительными трудностями, возникающими при расчете и проектировании мембранных блоков [1 – 3]. Мембранный блок представляет собой относительно несложную конструкцию, но при этом к нему предъявляют высокие требования к точности конструирования и производства, а также герметичности. Он состоит из нескольких основных частей, а именно, корпуса, диска ограничительного и распределительного с особыми профилями поверхностей, всасывающего и нагнетательного клапана и мембраны (Рис. 1), которая является главным рабочим органом мембранного компрессора. Мембрана выполняет функцию поршня, если проводить аналогию с поршневым компрессором, поэтому в зависимости от основных характеристик мембраны зависит устойчивость работы мембранных компрессоров. Основная нагрузка при работе компрессора такого типа приходится на нее. Мембрана разделяет две полости: жидкостную и непосредственно газовую (если рассматривать мембранный компрессор жидкостного типа), в процессе работы на нее оказывается воздействие высокого давления большое количество раз в минуту. По своим параметрам мембраны обычно изготавливаются относительно большого диаметра при несоизмеримо малой толщине. Поэтому крайне важно, чтобы материал, из которого изготовлена мембрана, отвечал критериям долговечности и прочности.

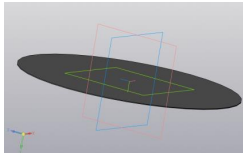


Рис. 1 Модель мембраны для мембранного компрессора

Цели и задачи работы. В данной статье будет рассмотрен теоретический мембранный компрессор, для которого будут рассмотрены две мембраны из нержавеющей стали и резины. Целью проведенной работы является оценочный выбор наиболее благоприятного материала для производства мембран мембранных компрессоров. Задачи работы – оценка 2 различных видов материала мембраны, сравнение их по различным показателям характеристик и выбор наиболее оптимального из предложенных материалов.

В качестве опытного образца для исследования мембран из различных материалов используется мембранный блок, проектируемого мембранного компрессора высокого давления с давлением нагнетания 300 кгс/см^2 (30 МПа), работающий на газообразном кислороде (Рис 2.):

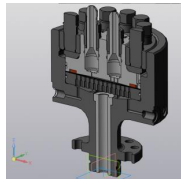


Рис 2. Проект мембранного блока для мембранного компрессора с давлением нагнетания 30МПа

Рассмотрим в качестве образцов для исследования 2 вида материалов, из которых производят мембраны для компримирования газа в мембранных компрессорах, оба материала отвечают ГОСТу 12.2.052-81 «Оборудование, работающее с газообразным кислородом» [4], а именно сталь нержавеющей 12Х18Н10Т и резина № 52-755.

Данные материалы были выбраны для сравнения, т.к. применяются в равной степени при производстве мембран для компрессоров и отличаются хорошим характеристиками по прочности. Так как в проектируемом мембранном компрессоре давление нагнетания высоко ($300 \text{ кгс/см}^2=30 \text{ МПа}$), то мембрана (диаметр 120 мм и толщина 0,4 мм) должна проходить по прочности в пределах перемещения 1,3 мм (максимальный ход мембраны в пределах ограничительного диска). При помощи программы SolidWorks были исследованы 2 мембраны, смоделированы закрепления в мембранном блоке (Рис. 3), распределена нагрузка (Рис. 4), смоделирована сетка (Рис. 5) и проведен анализ по напряжениям, перемещениям и запасу прочности для стали 12Х18Н10Т (Рис. 6-8) и резины № 52-775 (Рис. 9-11).

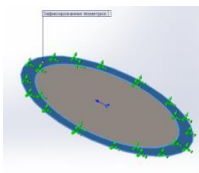


Рис 3. Моделирование закрепления мембраны

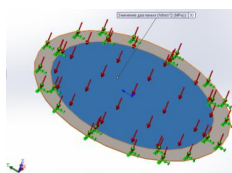


Рис. 4. Распределение нагрузки на мембрану

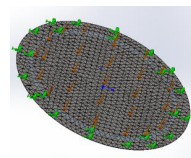


Рис. 5. Генерация сетки для модели

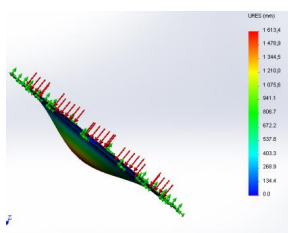


Рис. 6. Анализ по напряжениям для стали 12X18H10T

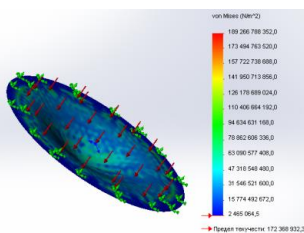


Рис 7. Анализ по перемещениям для стали 12X18H10T

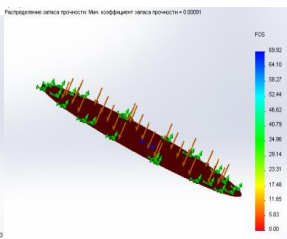


Рис. 8 Анализ по запасу прочности для стали 12X18H10T

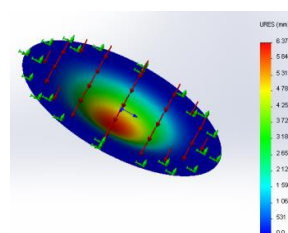


Рис. 9. Анализ по напряжениям для резины № 52-775

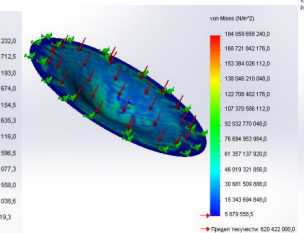


Рис. 10. Анализ по перемещениям для резины № 52-775

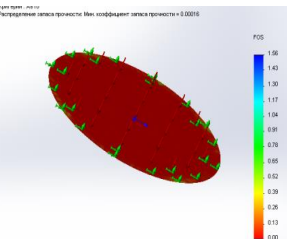


Рис. 11 Анализ по запасу прочности для резины № 52-775

Как видно из исследования обе мембраны отвечают требованиям по прочности в пределах максимально возможного перемещения 1,3 мм, поэтому выбор наиболее подходящего материала будет осуществляться путем сравнения коэффициента запаса прочности материалов. Наибольшим коэффициентом обладает мембрана, изготовленная из стали 12X18H10T (0,00091) в сравнении с резиной № 52-775 (0,00016). Поэтому предпочтительным вариантом для использования в компрессоре высокого давления является именно мембрана из нержавеющей стали.

Выводы. В результате проведенной предварительной оценки двух мембран из разных материалов для мембранного компрессора высокого давления, можно сделать вывод, что при прочих равных условиях, сравнительно одинаковых показателях при проверке на напряжения и перемещения, предпочтительным вариантом для изготовления мембраны будет являться сталь нержавеющая 12X18H10T, она обладает более высоким коэффициентом запаса прочности, чем мембрана из резины. Таким образом, при дальнейшем проектировании мембранного компрессора с давлением нагнетания 30МПа будет использоваться непосредственно стальная мембрана, которая будет проверена еще более подробным способом.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Алтухов С.М., В.А. Румянцев «Мембранные компрессоры» - М.: Машиностроение, 1967. 128с.
2. Френкель М. И. «Поршневые компрессоры: теория, конструкции и основы проектирования» - М.-Л.: Машгиз, 1960. 654 с.
3. Пономарев С.Д. «Расчеты на прочность в машиностроении» - М.: Машгиз, 1956. т. II, III.
4. ГОСТ 12.2.052-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Оборудование, работающее с газообразным кислородом. Общие требования безопасности (с Изменениями N 1, 2).

СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ РАБОЧИХ КОЛЕС ДЛЯ
ТУРБОДЕТАНДЕРА МОЩНОСТЬЮ 1 КВТ

В данной статье рассматривается сравнение различных конструкций турбинных рабочих колес для турбодетандера мощностью 1 кВт. Рабочие колеса спроектированы по различным специализированным методикам. Было проведено численное моделирование течения в турбине каждой из сравниваемых конструкций в программном пакете ANSYS CFX. Результаты использовались для сравнения.

Актуальность данной работы имеет практический характер, потому что утилизационные и турбодетандерные установки имеют потенциал для повышения эффективности широкого круга производств и электростанций. Рассматриваемые в работе конструктивные решения отличаются низкой себестоимостью при удовлетворительной эффективности, и применение подобных технологий позволит снизить стоимость турбодетандерных установок. Таким образом, их внедрение на производство станет экономически целесообразным. Благодаря вычислительным методам CFD предварительная оценка работы проектируемых РК позволяет за короткое время и при небольших затратах оценить работоспособность турбин различных типов и определить наиболее эффективную конструкцию.

Целью работы является выбор оптимального РК для турбодетандера мощностью 1 кВт. Основные задачи, решаемые в исследовании:

- 1) Сравнение расчетных характеристик турбин двух типов;
- 2) Экономическая оценка сравниваемых турбин.

Объектом исследования является турбодетандерная установка с одноступенчатой турбиной. В качестве рабочего тела применяется метан.

В работе [1] было доказано, что для данного турбодетандера возможно использование готового осерадиального РК от наддувного агрегата. Для расчета радиально-осевой центростремительной турбины применялась специализированная методика Розенберга. В связи с малой мощностью установки использовался парциальный подвод с лопаточным направляющим аппаратом. Создание трехмерной твердотельной модели РК турбины осуществлялось в приложении BladeGen пакета ANSYS Workbench.

Другим вариантом конструкции является радиальное рабочее колесо. Профилирование турбинной решетки производится по методике [2], разработанной одним из авторов и реализованной в программной среде MathCAD. В основе создания профилей лежит метод плоских линий тока, созданный на кафедре ТГиАД СПбПУ. Также используется метод конформного отображения [3], с помощью которого прямые профили переносятся на круговую решетку.

Осевой тип турбины не рассматривался в данном исследовании из-за меньшей эффективности в маломощных установках по сравнению с центростремительными турбинами, на которые дополнительное положительное влияние оказывает работа силы Кориолиса.

По результатам численного моделирования течения в проточных частях турбин были построены графики рабочих характеристик рассматриваемых турбин. Графики приведены на рисунках 1-3.

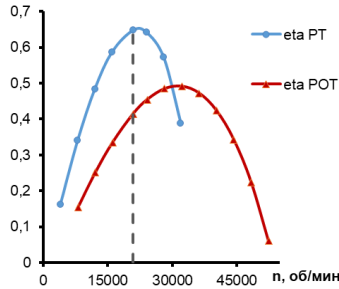


Рис. 1. График сравнения КПД радиальной (РТ) и радиально-осевой (РОТ) турбин

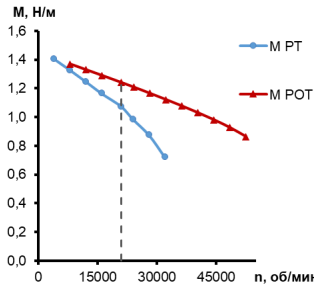


Рис. 2. График сравнения момента радиальной и радиально-осевой турбин

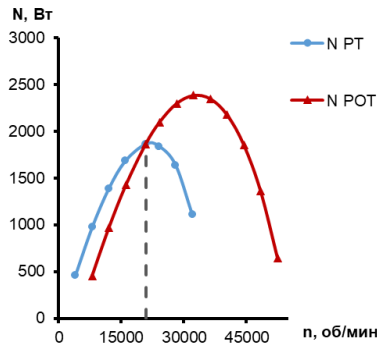


Рис. 3. График сравнения мощности с учетом потерь от частичного подвода радиальной и радиально-осевой турбин

Можно заключить, что радиальная турбина, спроектированная под условия работы данной турбодетандерной установки, показывает значительно большую эффективность на номинальном режиме, чем радиально-осевая. Причиной этого является то, что радиально-осевая турбина предназначена для турбонаддувного автомобильного агрегата и рассчитана на другие параметры. Она имеет большую номинальную мощность – 20 кВт и является более быстроходной. Существующие ограничения в передаточном устройстве не позволяют использовать радиально-осевую турбину при оптимальном значении частоты вращения.

С другой стороны, в данных условиях радиально-осевая турбина показывает лучшие силовые показатели – в частности, больший крутящий момент, что позволяет компенсировать недостатки ее эффективности.

Если обратиться к экономической стороне проблемы, то можно отметить, что данная турбодетандерная установка отличается невысокой стоимостью и коротким сроком самоокупаемости (до 5 лет). Радиальное рабочее колесо изготавливается цельнофрезерованным из листового металла, ротор имеет достаточно простую конструкцию. При этом в установке, как было доказано в [1], можно использовать серийную радиально-осевую турбину автомобильного турбонаддува. Стоимость такой турбины составляет 10-50 долларов США, что является ее несомненным преимуществом над радиальной турбиной.

Таким образом, использование радиально-осевой турбины позволяет снизить стоимость установки и значительно сэкономить время на ее проектирование и изготовление. Создание радиальной турбины связано с большими трудозатратами, однако такая турбина будет спроектирована для конкретных условий эксплуатации и будет отличаться высокой эффективностью работы на номинальном режиме, а подобные данной установки все время работают на номинальном режиме.

Точно оценить сроки окупаемости каждой из компоновок установки не представляется возможным, так как реального применения они еще не получили, однако можно с уверенностью заключить, что оба разработанных подхода к созданию турбоустановок могут обеспечить развитие и широкое применение подобных энергетических решений в промышленности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дзюбан, Роман Валерьевич. Радиально-осевая турбина турбодетандера мощностью 1 кВт [Электронный ресурс]: выпускная квалификационная работа бакалавра: 13.03.03 - Энергетическое машиностроение; 13.03.03_02 - Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели / Р. В. Дзюбан; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт энергетики и транспортных систем; науч. рук. М. В. Смирнов. — Электрон. текстовые дан. (1 файл: 22,5 Мб). — Санкт-Петербург, 2018. — <URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/v18-2553.pdf>>.
2. Рубцов, Иван Сергеевич. Одноступенчатая радиальная метановая турбина турбогенератора мощностью 1 кВт [Электронный ресурс]: выпускная квалификационная работа бакалавра: 13.03.03 - Энергетическое машиностроение; 13.03.03_02 - Газотурбинные, паротурбинные установки и двигатели / И. С. Рубцов; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт энергетики и транспортных систем; науч. рук. М. В. Смирнов. — Электрон. текстовые дан. (1 файл: 3,88 Мб). — Санкт-Петербург, 2018. — <URL:<http://elib.spbstu.ru/dl/2/v18-2552.pdf>>.
3. Митрохин В. Т. Выбор параметров и расчет центростремительной турбины на стационарных и переходных режимах [Текст] / В. Т. Митрохин. – М.: Машиностроение, 1974. – 228 с.

УДК 62-684

В.В. Гребенников, А.Р. Лебедев
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СОБСТВЕННЫХ НУЖД КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЙ

Актуальность. Ежесуточно во всем мире огромное количество природного газа транспортируется по трубопроводам от источников до потребителей. Компрессоры большой мощности, приводимые в действие в основном газотурбинными двигателями, используются для сжатия газа с целью его транспортировки. Для достижения стабильного, бесперебойного и экономически эффективного удовлетворения постоянно возрастающего внутреннего и

внешнего спроса на природное топливо, энергетической стратегией предусматривается сокращение потерь и снижение затрат на всех стадиях технологического процесса при добыче, подготовке и транспортировке газа.

В настоящее время все компрессорные станции (КС) снабжаются электричеством посредством высоковольтных линий, но их прокладка может оказаться дорогостоящим и небыстрым мероприятием. Одним из возможных источников энергии для энергоснабжения объектов сети газораспределения является кинетическая или потенциальная энергии потока газа, находящегося под давлением. Кинетическая энергия возникает вследствие перепада давления в начале и конце сети газораспределения. В большинстве случаев в сети имеется избыток этой энергии, часть которого можно направить на выработку электрической энергии.

Цель. Ввиду стремления предприятий к экономии денежных средств, а также невозобновляемостью ресурсов, целью данного исследования является анализ полученной полезной мощности для собственных нужд КС. Источником этой мощности является модернизированная газовая система газоперекачивающего агрегата (ГПА) 16М-06(08) «Урал» с расширительной турбиной вместо регулятора давления (РД).

Метод исследования. Для бесперебойного энергоснабжения необходимо применение современных источников питания, которые смогут вырабатывать электроэнергию по пути трассы газопровода вблизи места установки линейных потребителей и работать на природном топливе, отбираемом непосредственно из газопровода вблизи места их установки.

Для покрытия электрических нагрузок собственных нужд КС наиболее привлекательными являются детандер-генераторы на базе расширительных малорасходных турбин (МРТ), поскольку:

- для работы такого агрегата не требуется сжигание топлива;

- работа расширительных турбин органически вписывается в технологический процесс редуцирования топливного газа на КС [1].

На объектах газораспределительной сети нет необходимости всю кинетическую энергию потока газа преобразовывать в электрическую. Электроэнергии нужно вырабатывать ровно столько, сколько необходимо для обеспечения энергоснабжения объекта, а перепад давления на детандере должен быть при этом как можно меньше (т. к. газ еще предстоит транспортировать дальше по сети).

Для МРТ обязательным условием является высокая экономичность в широком диапазоне режимов работы. При использовании трансзвуковых и сверхзвуковых высокооборотных турбинных ступеней появляется возможность срабатывать в них большие перепады энтальпий при сравнительно высокой экономичности, ощутимо сократить число ступеней турбины и повысить компактность всей установки в целом.

При создании детандерных установок (ДУ), рациональным является применение турбин конструкции ЛПИ, в которых устраняются парциальные потери, характерные для малорасходных турбин [2]. Это обеспечивается малыми углами выхода потока из соплового аппарата, большими углами поворота и относительным шагом в лопатках рабочего колеса, в результате чего резко сокращается число лопаток, упрощается конструкция и технология изготовления турбины. Особенность кинематики таких турбин позволяет обеспечивать их высокую надежность в условиях высокотемпературного и двухфазного рабочего тела.

В данной работе предлагается вариант модернизации газовой системы для ГПА 16М-06(08) «Урал» для КС «Елизаветинская» путем установки расширительной турбины вместо РД. Зная данные на входе в блок редуцирования топливного газа и на выходе из него, представляется возможным рассчитать располагаемую мощность, которую можно получить при установке расширительной турбины.

Исходные данные [3]:

- рабочее тело - природный газ;
- давление газа на входе – $p_0 = 6,87$ МПа;
- расход топливного газа – $G = 3175$ кг/ч;
- давление на выходе из турбины – $p_2 = 2,8$ МПа;
- тип расширительной турбины - осевая;
- изоэнтروпийный КПД турбины – $\eta = 0,8$;

Содержание метана в природном газе будем считать 99%, значит можем принять газовую постоянную $R=519$ Дж/кг·К, удельную теплоёмкость метана $C_p=2703$ Дж/кг·К и показатель изоэнтروпы $k=1,311$.

Результаты. Расчет производился в программе “ONE” для одноступенчатой турбины конструкции ЛПИ, разработанной на кафедре «Турбины, гидромашин и авиационные двигатели» СПбПУ. Программа ONE основана на экспериментальных характеристиках потерь кинетической энергии в СА и РК турбины, исследованных в широком диапазоне режимных и геометрических параметров. Математическая модель одноступенчатой турбины конструкции ЛПИ выглядит как законченный моделирующий алгоритм, составленный из отдельных блоков, в которых описываются процессы в проточной части турбины с учетом их связей и взаимного влияния

Целевой функцией оптимизационных расчетов является внутренний КПД, который должен быть не менее 60%. Чтобы достичь подобных результатов, варьируем величину среднего диаметра, высоту лопаток, угол входа и выхода в РК. Температура на выходе из турбины должна быть 5°C (278 К), что достигается изменением температуры на входе в турбину. Рассмотрим влияние среднего диаметра на КПД установки на рис. 1.

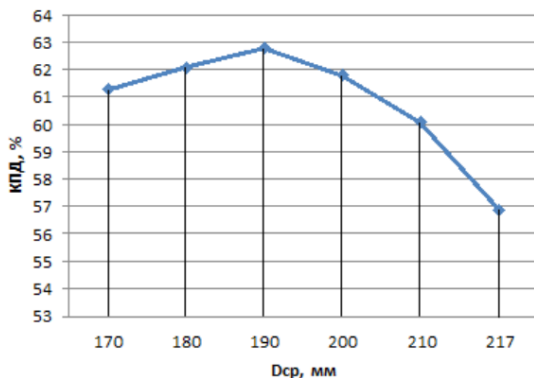


Рис.1 Зависимость КПД от среднего диаметра турбины

Из графика следует, что наибольшее значение КПД достигается при $D_{ср} = 190$ мм.

Значения варьируемых величин для данного КПД при этом:

- Высота сопловой лопатки – $l_1 = 4$ мм;
- Высота рабочей лопатки – $l_2 = 7$ мм;
- Угол входа в РК – $\beta_1 = 13,5^\circ$;
- Угол выхода из РК – $\beta_2 = 8,9^\circ$.

Основные параметры ДУ представлены в таблице 1.

Таблица 1 Результаты расчета в программе “ONE”

Параметр	Обозначение	Размерность	Величина
Степень реактивности	ρ_T	-	0,024
Число Маха в СА	M_{1t}	-	1,494
Газодинамический угол выхода потока из СА	α_1	град	7,24
Расход рабочего тела через СА	G_1	кг/с	0,881
Статическое давление за турбиной	P_2	МПа	2,8
Число Маха на выходе из РК в относ. движении	M_{2t}	-	0,663
Внутренняя мощность турбины	N_b	кВт	99,7
Внутренний КПД турбины	η_b	-	0,628

Выводы. На КС для достижения бесперебойной транспортировки газа на режиме «Магистраль» одновременно используются 5 ГПА. Таким образом, суммарная электрическая мощность, полученная за счет применения ДУ в составе газовой системы, составляет порядка 480 кВт. Данную мощность можно использовать для нужд окружающих потребителей или объектов инфраструктуры КС.

За счет применения детандер-установки появляется возможность полноценно перевести ГПА 16М-06(08) «Урал» на автономный режим работы. Это возможно из-за того, что потребляемая КС электрическая мощность при предпусковой подготовке, пуске, штатной нагрузке, останове и работе от аварийного источника не превышает 300 кВт [3, 4].

ЛИТЕРАТУРА:

1. Автономные энергоустановки для выработки электрической и тепловой энергии/ А. Грачев, С. Счисляев, С. Олеников, В. Рассохин, Е. Ходак/Газотурбинные технологии, 2003, №5, с.28-31.
2. Бусурин В.Н., Рассохин В.А., Садовничий В.Н. Высоконагруженные малорасходные ступени ЛППИ для перспективных турбоустановок. В сб.: Исследование элементов теплоэнергетических установок. Сборник научных трудов. Брянск, Издательство БГТУ, 1999.
3. Руководство по эксплуатации ГПА-16М-06 «Урал», ГПА-16М06.0000-000 РЭ, с.98-118
4. Таблица приемников электроэнергии ГПА 16М-(06) «Урал», ГПА16М-06.0000-000 ТБ, с.16-18.

УДК 621.165.51

В.В. Гребенников, В.А. Рассохин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ОПТИМАЛЬНАЯ ТЕПЛОВАЯ СХЕМА ДЛЯ СУДОВОЙ ПАРОТУРБИНОЙ УСТАНОВКИ МОЩНОСТЬЮ 24 МВт

Актуальность. Судовые паротурбинные установки являются главным двигателем на ледоколах, совершающих плавания по Северному морскому пути (СМП). В интересах России СМП обеспечивает, прежде всего, функционирование транспортной инфраструктуры государства в особенно труднодоступных районах [1]. Без ледокольного флота обеспечить функционирование инфраструктуры в труднодоступных регионах будет невозможно, что отразится на экономическом состоянии как этих регионов, так и страны в целом. Ледоколы совершают плавания по СМП в течение большого промежутка времени, без возможности захода в порт. Таким образом совершенствование двигателей для ледоколов позволит повысить экономические показатели, при этом не оставляя без внимания проблему надежности и продолжительности рейса ледокола.

Цель. Ввиду приближения предполагаемого года выработки ресурса 200 тыс. часов у мелкоосадочных ледоколов, работающих на арктическом шельфе, необходимо проработать варианты модернизации их паротурбинных установок мощностью 24 МВт. Основной задачей является выбор оптимальной тепловой схемы и параметров рабочей среды.

Метод исследования. При выборе оптимальной тепловой схемы и параметров рабочей среды для турбины учитываем, что влажность пара в проточной части выше 12,5% не допускается, так как может привести к эрозионному разрушению лопаток последних ступеней. Кроме того, отметим, что реально достижимое давление в конденсаторе не может быть менее 5 кПа.

Соответствующие ограничения нанесены на $h-s$ -диаграмму, интересующий участок которой представлен на рис.1. Здесь точка с температурой $t = 285^{\circ}\text{C}$ и давлением $p = 3,4$ МПа ($h = 2941$ кДж/кг) представляет параметры на выходе из парогенератора. Видно, что процесс расширения в проточной части, начинающийся непосредственно в этой точке, может быть проведен только до давления порядка 21 кПа, поскольку при дальнейшем уменьшении давления влажность недопустимо возрастает. Оценка соответствующего теплоперепада показывает, что располагаемой производительности реактора недостаточно для обеспечения мощности, требуемой от турбины ледокола.

С учетом вышеизложенного и учитывая ограниченность расхода, решим задачу о поиске крайних параметров, соответствующих максимальному теплоперепаду [2]. Возможные параметры на входе в турбину ищем вдоль горизонтальной линии $h = 2941$ кДж/кг, представляющей процесс дросселирования пара на выходе из парогенератора. На рис.1 видно, что этому требованию отвечает турбина с давлением перед проточной частью порядка 1,7-1,8 МПа. На первый взгляд такое конструктивное решение не соответствует реактору, производящему пар с давлением $p = 3,4$ МПа. Однако из опыта эксплуатации, на ледоколах практически никогда не используется мощность на 100%, а, следовательно, постоянно поддерживается более низкое давление перед проточной частью и, соответственно, меньшая влажность на выходе.

Из $h-s$ -диаграммы видно, что, если придерживаться условий $p = 3,4$ МПа, $t = 285^{\circ}\text{C}$, оптимальной является схема турбины с промежуточным сепаратором или с сепаратором-пароперегревателем. Появление сепаратора заставляет выполнить турбину двухкорпусной, а низкое давление в конденсаторе – выполнить ЦНД по типу “бабочка”.

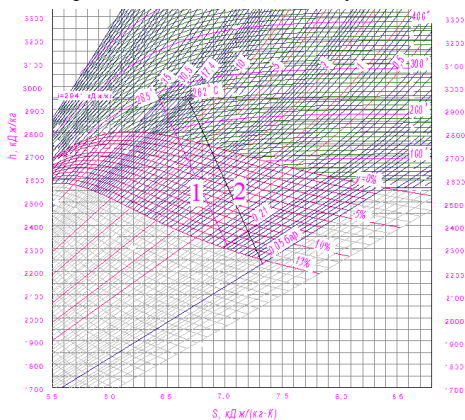


Рис. 1 Тепловой процесс турбины. Подвод пара к турбине: 1 - непосредственно от парогенератора; 2 - с дросселированием на входе.

Отметим, что:

- однокорпусная турбина с выходом к сепаратору и возвратом пара в тот же корпус в сочетании с двухпоточным выхлопом представляется крайне неконструктивной;

- выполнение ЦНД по типу “бабочка” позволяет уменьшить длину лопаток последней ступени и габариты выхлопной части, что является преимуществом для конструкции судовых турбин;

- использование конструкции с двухцилиндровой турбиной с промежуточным сепаратором или с сепаратором-пароперегревателем и ЦНД типа “бабочка” целесообразнее при большей мощности турбины, так как габаритные показатели существенно возрастают, увеличивая тем самым затраты на 1 МВт полезной мощности. С учетом высказанных выше требований по конечной влажности и давлению в конденсаторе можно выделить следующие варианты одноцилиндровых турбин:

1. Проточная часть типа “бабочка” с давлением перед соплами 3,05 МПа (потерю от начального давления $p = 3,4$ МПа до входа в сопловой аппарат оцениваем $\Delta p = 0,35$ МПа), давление в конденсаторе 21 кПа;

2. Проточная часть типа “бабочка” с давлением в конденсаторе 5 кПа и с дросселированием пара перед соплами;

3. Прямолинейная проточная часть (однопоточная) с давлением перед соплами 3,05 МПа, давление в конденсаторе 21 кПа;

4. Прямолинейная проточная часть (однопоточная) с давлением в конденсаторе 5 кПа.

Однопоточный вариант с давлением в конденсаторе 5 кПа сразу исключаем из рассмотрения, поскольку здесь требуется лопатка длиной 685 мм, что намного больше, чем в любых существующих судовых машинах настоящего времени. Однопоточный и двухпоточный варианты с давлением в конденсаторе 21 кПа технически реализуемы, однако удельный расход пара в этих случаях будет порядка 6,5 кг/(кВт·ч), что уместно для кораблей специального назначения, а для коммерческих судов вряд ли будет конкурентоспособно [3]. Таким образом, в результате рассмотрения приемлемым вариантом является проточная часть типа “бабочка” с давлением в конденсаторе 5 кПа.

Результаты. Основная проблема турбин с повышенным давлением в конденсаторе заключается в уменьшении производимой паром работы и появлении необходимости использования дополнительного источника энергии, который должен выводить мощность на винтах до номинального уровня [4]. В табл.1 представлены сведения об удельном расходе пара и необходимой дополнительной мощности для машин с давлением в конденсаторе 21 кПа и 5 кПа.

В табл.1:

- вариант 1 – пар поступает к сопловому аппарату с давлением 3,05 МПа, давление в конденсаторе 21 кПа,

- вариант 2 – пар поступает к сопловому аппарату с давлением 1,74 МПа, давление в конденсаторе 5 кПа, и на режиме максимальной нагрузки обязательный расход травления направляется в деаэрагор.

Мощность дополнительного источника определяется как разность между номинальным значением 24 МВт и мощностью на клеммах генератора. В свою очередь мощность на клеммах генератора определялась как 97% от мощности на валу турбины. Мощность на валу турбины определялась по итогам теплового расчета проточной части.

Таблица 1. Сопоставление вариантов с давлением в конденсаторе 21 кПа и 5 кПа

Параметр	Размерность	Вариант	
		1	2
Давление перед соплами	МПа	3,05	1,74
Давление в конденсаторе	кПа	21	5
Мощность на валу турбины: при расходе 265 т/ч при расходе 295 т/ч	МВт	20,4 22,7	22,2 24,73
Мощность дополнительного источника: при расходе 265 т/ч при расходе 295 т/ч	МВт	4,2 2,0	2,5 -
Удельный расход пара в турбине	кг/(кВт·ч)	6,5	6,0

Выводы. В рамках данного исследования установлено, что для вновь разрабатываемой ПТУ для ледокольного флота конструкция ПТУ с одноцилиндровой турбиной с проточной частью типа «бабочка» с пониженным относительно паропроизводящей установки давлением перед проточной частью, давлением в конденсаторе 5 кПа обеспечиваются необходимые значения степени влажности (менее 12,5%).

Данный вариант тепловой схемы и выбранными параметрами рабочей среды на входе в турбину позволяет на основных режимах работы полностью отказаться от дополнительного источника энергии.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Роль Северного морского пути /СЕВЕР – промышленный. 2007. № 1-2. С. 16-25.
2. Грунин С. Ф. Проектирование элементов судовых машин, транспортных и загрузочных технологических устройств: Учеб. пособ. – Л.: Судостроение, 1989 – 272с.
3. Верете А. Г. Судовые турбомашин. Устройство и эксплуатация, изд. 3-е. Изд-во «Транспорт», 1971 – 384с.
4. Слободянюк Л. И., Поляков В. И. Судовые паровые и газовые турбины и их эксплуатация: Учебник. – Л.: Судостроение, 1983. 360с.

УДК 621.438

Г.С. Коленько, А.С. Ласкин

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ СООТНОШЕНИЙ ОСЕВОЙ ТУРБИНОЙ СТУПЕНИ НА АМПЛИТУДЫ И ФАЗЫ ПЕРЕМЕННЫХ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА РАБОЧИЕ ЛОПАТКИ

Современная тенденция снижения металлоемкости турбинных двигателей, реализуемая в виде конструкторских решений, заключающихся в уменьшении числа ступеней за счет применения высоконагруженных лопаточных аппаратов, приводит к увеличению статических и динамических нагрузок на рабочие лопатки, и обостряет проблему вибрационной надежности последних.

Для оценки виброндежности рабочих венцов осевых турбин на этапе проектирования, весьма полезной и даже необходимой является информация о переменных аэродинамических

нагрузках, действующих на вращающиеся лопатки, а именно – амплитуды, фазы, частотный спектр и распределение газовых сил по высоте рабочей лопатки.

Практической значимостью обладают задачи исследования влияния геометрических соотношений осевой турбинной ступени, - таких как относительный межвенцовый осевой зазор $\bar{\delta}_{z1}$, отношение шагов рабочих и направляющих лопаток t_2/t_1 , относительная высота лопатки l/d , - на амплитуды и фазы переменных аэродинамических сил (ПАС) на рабочих лопатках. Таким исследованиям посвящен ряд отечественных и зарубежных работ [1 – 6].

Целью данной работы является краткий обзор и сопоставление некоторых результатов, полученных различными научными школами – как между собой, так и с собственными наработками авторов доклада.

В работе *Tomomi, Yoshio и др.* [2], 2013 исследуется влияние величины межвенцового зазора (рис. 1) и отношения шагов РЛ / НЛ на амплитуды и фазы аэродинамических нагрузок. Из рис. 1 видно, что амплитуда ПАС уменьшается с ростом осевого зазора, но немонотонно.

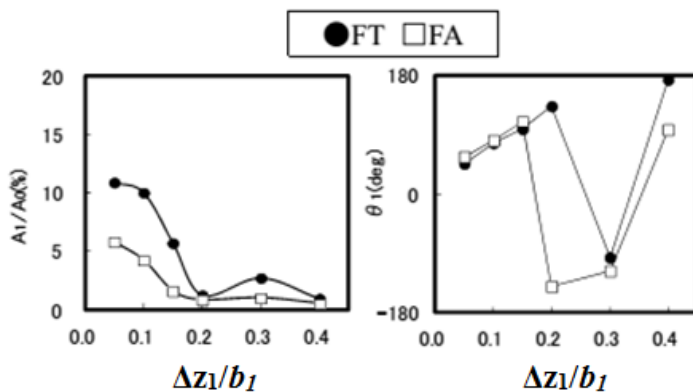


Рис. 1 Амплитуды и фазы переменной аэродинамической нагрузки на рабочие лопатки в зависимости от относительного осевого зазора [2, fig. 4]: FT – тангенциальная сила; FA – осевая сила; $t_2/t_1 = 0,571$ (результаты CFD-расчета)

В работе *Korakianitis* [1], 1992 также исследуется с помощью численного моделирования влияние осевого зазора отношения шагов РЛ / НЛ на амплитуды и фазы ПАС. Сравнивая рис. 1 и рис. 2, можно заметить схожее поведение фаз: наблюдается минимум при $\bar{\Delta z}_1 = 0,3$.

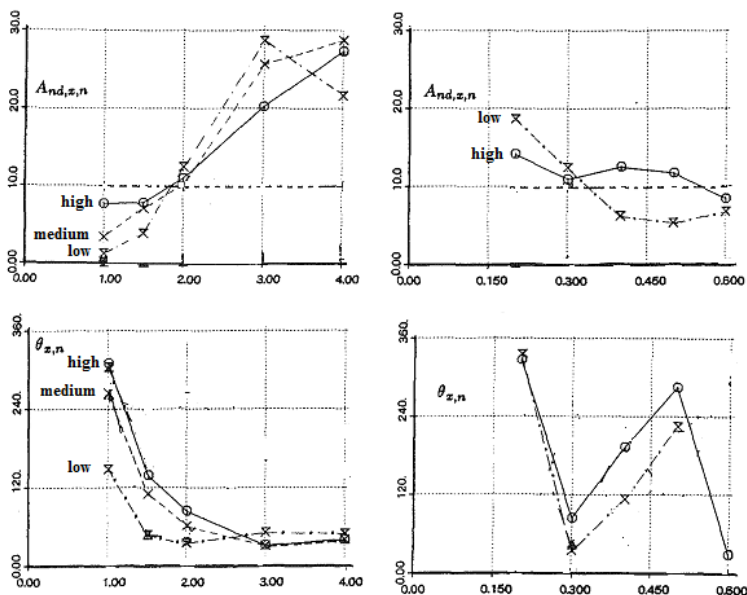


Рис. 2 Амплитуды и фазы переменной аэродинамической нагрузки на рабочие лопатки в зависимости от отношения шагов t_2/t_1 (слева) и от относительного осевого зазора $\bar{\Delta z}_1$ (справа) [1, fig. 3, 9]: high, medium, low – периферийный, средний, корневой радиус соответственно

В диссертации *Неуена К.К.* [3], 2015 также исследуется влияние межвенцового осевого зазора на размахи ПАС. Кривая изменения тангенциальной ПАС ΔP_u на рис. 3 имеет форму, близкую аналогичной кривой на рис. 1. Кроме того, сравниваемые зависимости имеют схожие диапазоны изменения относительных размахов силы: $\Delta P_u / P_u = 20 - 10\%$ при $\bar{\Delta z}_1 = 0,2 - 0,4$.

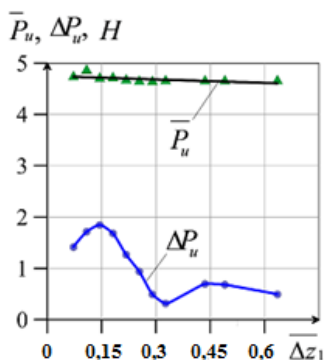


Рис. 3 Зависимости осредненных во времени постоянной составляющей и размаха тангенциальной ПАС, действующих на РЛ, от относительного осевого зазора [3, рис. 4.10] (результаты CFD-расчета)

На рис. 4 представлено изменение ПАС на рабочую лопатку в трех сечениях в процессе вращения ротора относительно направляющего аппарата, полученное авторами доклада в результате моделирования нестационарного течения в ступени ЛПИ ($d/l=13$), описанной в [3]. Из рис. 4 видно, что главные гармоники возмущающих аэродинамических воздействий практически синфазны по высоте лопаток. Высокий уровень размахов сил (39 %) объясняется малым относительным зазором ($\bar{\Delta}z_1 = 0,07$) и нерасчетным режимом ($u/C_0 = 0,424$).

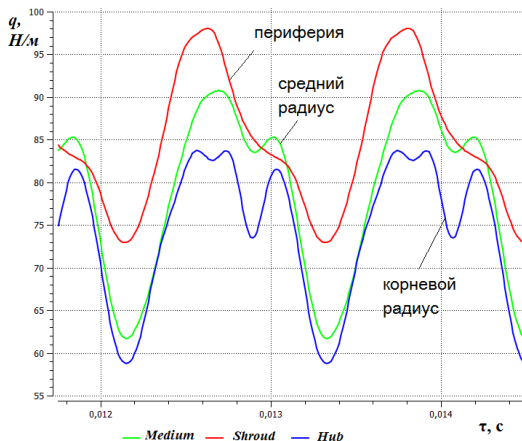


Рис. 4 Периодическое изменение погонной переменной аэродинамической нагрузки на рабочую лопатку ступени ЛПИ: $u/C_0 = 0,424$; $t_2 / t_1 = 0,53$; $\bar{\Delta}z_1 = 0,07$ (результаты CFD-расчета в Ansys CFX)

Выводы. Для осевых турбинных ступеней различных производителей с относительным межзеновым зазором в диапазоне $\bar{\Delta}z_1 = 0,2 \div 0,5$ характерен уровень относительных размахов переменных аэродинамических сил в диапазоне 30÷7 % соответственно. Такой уровень ПАС может быть опасным с точки зрения вибрационной надежности при околорезонансных режимах и низких уровнях демпфирования. Для точного прогнозирования этого уровня по-прежнему необходим численный расчет нестационарного течения для каждой конкретной турбинной ступени, по возможности подкрепленный экспериментальными исследованиями.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Korakianitis T. On the prediction of unsteady forces on gas turbine blades: Part 2 –Analysis of the Results // Journal of turbomachinery, Vol. 114, issue 1, 1992.
2. Nakajima, Tomomi; Shikano, Yoshio; Yamashita, Yutaka Prediction of Unsteady Force for Axial Turbine Buckets (Effects of Nozzle-Bucket Axial Gap Length and Blade Count Ratio) // Proceedings of ASME Turbo Expo 2013: Turbine Technical Conference and Exposition, June 3-7, 2013, San Antonio, Texas, USA.
3. Нгуен Куок Куан Нестационарные нагрузки и КПД дозвуковой осевой турбинной ступени (численное моделирование, пакет Ansys CFX): дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2015. 122 с.
4. Funazaki K., Yamada K., Kikuchi M., Sato H. Detailed Studies on Aerodynamic Performance and Unsteady Flow Behaviors of a Single Turbine Stage with Variable Rotor-Stator Axial Gap // International Journal of Gas Turbine, Propulsion and Power Systems (Japan). Dec 2008. Vol. 2. No. 1. P. 30-37.
5. Rzadkowski, R.; Gnesin, V.; Kolodyazhnaya, L. Aeroelasticity Analysis of Unsteady Rotor Blade Forces and Displacements in LP Last Stage Steam Turbine with Various Pressure Distributions the Stage Exit // Journal of Vibration Engineering & Technologies, volume 6, issue 5, 2018.

РЕГЕНЕРАТИВНАЯ ГТУ С ДВУХСТУПЕНЧАТЫМ СЖАТИЕМ И РАСШИРЕНИЕМ РАБОЧЕГО ТЕЛА

На сегодняшний день во всем мире наблюдается тенденция к постепенному переходу от традиционной энергетики к альтернативной [1]. Основной причиной данного перехода является использованием возобновляемых источников энергии, в том числе биомасс. Использование установок, работающих на данном вида топлива, поможет избежать экологического кризиса, а также даст научно-технический задел для дальнейшего энергообеспечения. На данный момент газотурбинные установки (ГТУ), работающие по регенеративному циклу, отлично справятся с поставленными задачами [2].

В качестве примера будет рассмотрена регенеративная ГТУ с двухступенчатым сжатием и расширением (рис. 1). Одной из отличительных особенностей данной установки является наличие промежуточного охлаждения и промежуточного перегрева. Необходимостью применения данных особенностей является то, что реализовать изотермические процессы в реальных тепловых двигателях довольно трудно, практически невозможно. Именно поэтому на практике свое применение находят промежуточное охлаждение газа при его сжатии и промежуточный подогрев при его расширении [3].

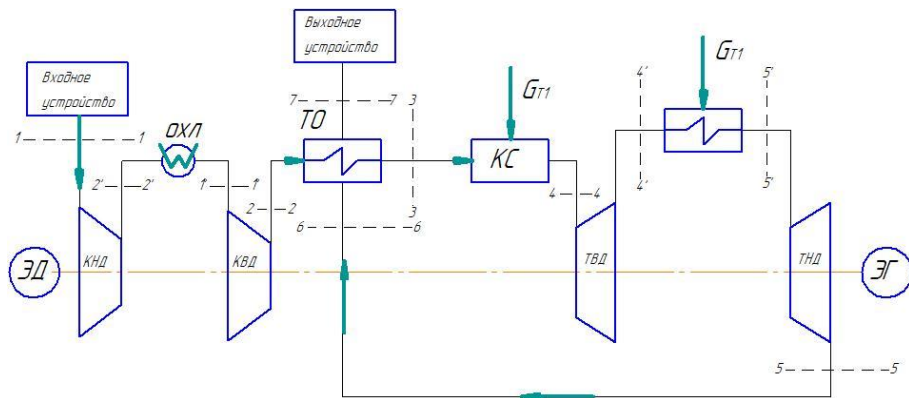


Рис. 1. Регенеративная ГТУ с двухступенчатым сжатием и расширением

Несмотря на то что, охлаждение в компрессоре способствует уменьшению работы, затрачиваемой на его сжатие, это существенно влияет на увеличение стоимости установки. Именно поэтому здесь используется более распространенный вариант с внешним охлаждением газа в межступенчатых теплообменных аппаратах. В данной схеме (см. рис. 2) сжатый воздух из компрессора низкого давления (КНД) поступает во внешний охладитель, в котором он изобарно охлаждается, отдавая часть своего теплосодержания холодному теплоносителю, в следствие чего его температура опускает до первоначальной, затем он снова сжимается в компрессоре высокого давления (КВД).

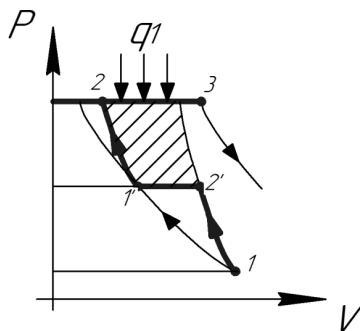


Рис. 2. p, v -диаграмма двухступенчатого компрессора с одним промежуточным охладителем

На диаграмме точка 1 соответствует параметрам воздуха в окружающей среде с температурой T_1 . Процесс 1-2'- политропное сжатие воздуха в КНД; 2'-1'- изобарное охлаждение сжатого воздуха в охладителе первой ступени до температуры T_1 ; 1'-2- политропное сжатие воздуха во второй ступени компрессора и его вытеснение компрессором в теплообменный аппарат (ТО), где он изобарно нагревается (процесс 2-3). Роль ТО заключается в том, чтобы минимизировать количество топлива, которое будет затрачиваться на нагрев воздуха перед турбиной высокого давления (ТВД). Далее подогретый воздух попадает в камеру сгорания (КС), где осуществляется первая ступень изобарного подвода теплоты к рабочему телу (процесс 3-4). Далее газы адиабатно расширяются в ТВД (процесс 4-4') и поступают во второй теплообменник. Процесс 4'-5' характеризуется изобарным промежуточным подогревом в ТО, который в совокупности с промежуточным охлаждением приводит к повышению полезной работы и термического КПД установки. После теплообменного аппарата газы поступают в турбину низкого давления (ТНД), где адиабатно расширяются. После газы поступают в теплообменник, где они нагревают воздух перед КС (процесс 5-6). Отработавшие газы после ТО выбрасываются в атмосферу, где они охлаждаются до температуры окружающей среды.

Подводя итоги всего вышесказанного можно прийти к выводу, что установки, работающие на возобновляемых источниках энергии, помогут решить целый ряд проблем, а также создать задел для будущих исследований. В частности, задел для безопасной и эффективной утилизации биомассы, с получением как тепловой, так и электроэнергии. Если затрагивать экономическую составляющую, то использование подобных ГТУ повысит рентабельность в различных отраслях сельского хозяйства.

ЛИТЕРАТУРА:

1. York R. Do alternative energy sources displace fossil fuels? // Nature Climate Change. – 2012. – V. 2. – No. 6. – P. 441-443.
2. Barskov V.V., Besedin S.N., Besedina K.S., Rassokhin V.A., Smetankin A.I., Nikiforova O.V. Modern low-power class turbo generators in the gas transmission system, Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems, 2018.
3. Сахин В.В. Устройство и действие энергетических установок: в 2-х т. / В.В. Сахин; Балт. гос. тех. ун-т.- Санкт-Петербург., 2015. -133 с.

EXPERIMENTAL RESEARCH IN POSSIBILITIES OF QUALITY IMPROVEMENT OF
BURNING PROCESSES IN BURNERS OF TURBINES

According to experts, the power-generating complex in the entire chain from fuel production to the thermal energy application efficiency of the use of energy resources is only 44 %. That necessitates the researching of ways to enhance efficiency of organic fuel burning. One of the way to solve the problem is the burning fuel in the swirl burner with using of ionized air. Domestic and international researches have shown that atomic oxygen increases the completeness combustion and reduces the number emitted into the atmosphere of pollutant emissions. At present, the reduction of air pollution of toxic substances allocated by industrial enterprises, is one of the most important problems facing humanity. Air pollution has a unhealthy exposure for humans and the environment. In this paper estimated effectiveness of existing chemical kinetic mechanisms of natural gas burning for the swirl burner and mechanisms unhealthy emissions produced based on the results of the evaluation.

The purpose of work is to increase the effectiveness of fuel combustion and technical and economic, as well as environmental indicators in burners of turbines.

Existing kinetic mechanisms of natural gas combustion in the swirl burner in terms of atomic oxygen ionization are not validated because the lack of validation experimental data. Development of heat and power engineering in current days is connected with the necessity of the most important task of the combustion chamber (CC) and firebox furnaces (FF) toxicity reducing, used in gas, steam turbines and in combined-cycle plants [1, 2]. Various methods are used for the toxic emissions from CC and FF suppression [1, 3 – 5], the most promising of which to the method of air ionization, supplied to the fuel combustion zone [6 – 9]. So, this work dedicated to experimental investigation of fuel burning intensification in swirl burner using air ionization on the heat-and-power engineering plant, which the most important. By the object of research was chosen swirl burner because it proved its high characteristics of ignition, durability, technological effectiveness reliability and as well the possibility of considering the swirl burner as physical model of fuel combustion in CC and FF. The purpose of paper is to increase of fuel combustion efficiency as well, as environmental indicators in the swirl burner on the heat-and-power object. For achieve this target we developed testing stand, consisting of: swirl burner, ionizing device releasing atomic oxygen and the measuring equipment for carrying out experiments and obtain results [9]. Simultaneously following research works were solved: have been carried out experimental studies, information processing and analysis of experimental studies.

For carrying out scientific experimental researches the physical simulation method was used as the most optimal. In accordance with compatible schematic diagram of testing stand in published works [9, 10], special testing stand was developed, where new experimental data were obtained. The photograph of this stand is shown on Fig. 1.

As a flammable gas, a propane-butane mixture of the following composition was used: propane (C_3H_8) — 80 %; butane (C_4H_{10}) — 13 %; ethane (C_2H_6) — 3,5 %; ethylene (C_2H_4) — 3,5 %. Preliminarily flammable gas and air were fed into the swirl burner (7) from sources. At the same time, the following indicators were measured: air temperature — $T_{air} = 300,15^\circ K$; gas temperature — $T_{gas} = 300,15^\circ K$; static air pressure — $P_{static\ air} = 3236\ Pa$; static gas pressure — $P_{static\ gas} = 4423\ Pa$; total air pressure — $P_{air}^* = 3481\ Pa$; total gas pressure — $P_{gas}^* = 4444\ Pa$.

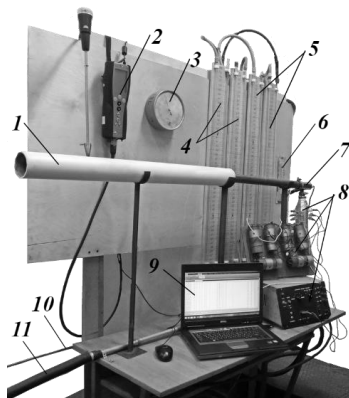


Fig. 1. Purpose-designed polyfunctional testing stand:

- 1 — exhaust pipe; 2 — flue gas analyzer; 3 — aneroid barometer; 4 — pressure gauges (flammable gas); 5 — pressure gauges (air); 6 — thermometer; 7 — swirl burner; 8 — ionizing device; 9 — laptop pc; 10 — sooting pipe for flammable gas; 11 — sooting pipe for air

Further, according to the received data, the following were calculated: air speed — $c_{air} = 20,2$ m/s; gas speed — $c_{gas} = 4,7$ m/s; air flowrate — $G_{air} = 0,005$ kg/s; gas flowrate — $G_{gas} = 0,0003$ kg/s. In accordance with the results of the calculations, the reaction mass were fed into the swirl burner (7) through sooting pipes (10) and (11). Before the air was supplied to the combustion, it was passed through the ionizing device (8). That is air passed through an inhomogeneous stationary electric field. This produces the formation of atomic oxygen, which is the most powerful oxidant. More detailed description of the work ionizing device is contained in a published work [8]. In the swirl burner (7) simulated the processes occurring in CC. Combustion products were discharged through the exhaust pipe (1) and certain chemical compounds were determined by means of a flue gas analyzer (2).

The performed analysis of experimental studies allows us to draw the following conclusions:

The air ionization air before entering the swirl burner in the research range of temperature changes in the combustion zone leads to a reduction in emissions CO by 39,1 %;

Scientific novelty lies in the fact that we are acting not on fuel, with the air agent in the combustion zone, we activate atomic oxygen in a way that the activation energy without temperature increase will be sufficient for efficient combustion, and this economical effectiveness;

The performed experimental studies have shown the efficiency of purpose-designed polyfunctional testing stand and the expediency of its further use for expanding the range of experimental studies.

REFERENCES:

1. V. A. Mitrofanov, O. A. Rudakov, Y. V. Sigalov / A methodology for calculating unsteady combustion in a gas-turbine engine // Thermal Engineering. 2005. T. 52. № 11. P. 874 — 878.
2. Митрофанов В. А. Закономерности образования вредных веществ и повышение экологичности ГТД: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.04.12 / Митрофанов Валерий Александрович. — Санкт-Петербург, 2000. — 16 с.
3. Маспанов С. Н. Методика инженерно-проектировочного расчета вихревых горелочных систем камер сгорания на основе ВЗГМ [Текст] / С. Н. Маспанов, И. А. Богов, В. В. Толмачев, В. А. Рассохин // XLIV Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. 30 ноября — 05 декабря 2015 г. Часть I. / — СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2015. — С. 49 — 51.

4. S. Coogan, X. Gao, A. McClung, W. Sun / Evaluation of kinetic mechanisms for direct fired supercritical oxy-combustion of natural gas // ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition Volume 4A: Combustion, Fuels and Emissions. Seoul, South Korea, June 13 – 17, 2016.
5. G. K. Vedeshkin, E. D. Sverdlov / Organization of low-emission combustion of gas in gas-turbine plants // Thermal Engineering. 2005. Т. 52. № 11. P. 829 — 832.
6. Indoor Air Chemistry: Cleaning Agents, Ozone and Toxic Air Contaminants // URL: <https://www.arb.ca.gov/research/apr/past/01-336.pdf> (Date of access: 26.09.2018).
7. W. S. Y. Hung / Carbon monoxide emissions from gas turbines as influenced by ambient temperature and turbine load // Gas Turbines Power 115 (3), 588 — 593 Jul 01, 1993.
8. Маспанов С. Н. Озонирование окислителя как метод интенсификации горения топлива на объектах теплоэнергетики [Текст] / С. Н. Маспанов, И. А. Богов, В. А. Суханов // XLVI Неделя науки СПбПУ: материалы научного форума с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. 13 ноября — 19 ноября 2017 г. Часть I. / — СПб.: Изд-во Политехн. Ун-та, 2017. — С. 114 — 116.
9. Маспанов С. Н. Патент на полезную модель № 175593. Стенд для исследования влияния озона на процессы в камере сгорания газотурбинной установки / С. Н. Маспанов, И. А. Богов, В. В. Толмачев, В. А. Суханов; номер заявки: 2017108076, дата регистрации: 10.03.2017.
10. Толмачев В. В. Экспериментальные исследования на физических моделях вихревого запально стабилизирующего горелочного модуля для турбоустановок [Текст] / В. В. Толмачев, И. А. Богов // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. № 147-1. — С. 85 — 94.

УДК 421.438.001.2

А.А. Чумакова, А.К. Нгуен, К.Л. Лапшин
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СРАВНЕНИЕ ПОТЕРЬ В НАПРАВЛЯЮЩЕМ АППАРАТЕ ТУРБИНЫ НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ТРАДИЦИОННОЙ И БИРОТАТИВНОЙ СХЕМАХ

Актуальность. В статье [1] в результате 2D многорежимной компьютерной оптимизации установлено преимущество биротативной схемы по сравнению с традиционной двухступенчатой (ТВД и ТНД) газовой турбины турбовального двигателя. Выигрыш в экономичности обусловлен уменьшением потерь кинетической энергии в направляющем аппарате (НА) ТНД вследствие уменьшения в нем угла поворота потока. Для того, чтобы убедиться в снижении потерь кинетической энергии в НА ТНД биротативного типа по сравнению с традиционной ТНД, наиболее корректно было бы провести натурные или модельные экспериментальные исследования двухступенчатых отсеков (ТВД+ТНД) турбин указанных типов. Такие исследования, однако, весьма длительны, трудоёмки и дороги. Во многих случаях теперь их можно заменить численным экспериментом, используя в качестве виртуального стенда возможности программы ANSYS CFX [2], что и будет показано ниже.

Цель работы. Сравнение потерь в направляющем аппарате турбины низкого давления в традиционной и биротативной схемах с помощью вычислительного комплекса ANSYS CFX, применяемого в качестве виртуального стенда для выполнения 3D аэродинамических исследований.

Постановка задачи. По результатам многорежимной компьютерной оптимизации были спроектированы два пера направляющей лопатки ТНД для турбин традиционного и биротативного типа. Профилирование направляющих лопаток выполнялось по трем сечениям (корневое, среднее и периферийное) с использованием атласа профилей МЭИ [3]. Затем в программе КОМПАС-3D были созданы трехмерные модели пера направляющих

лопаток ТНД двух вариантов турбин (рис. 1 и 2). Центры масс профилей ориентированы вдоль радиуса.

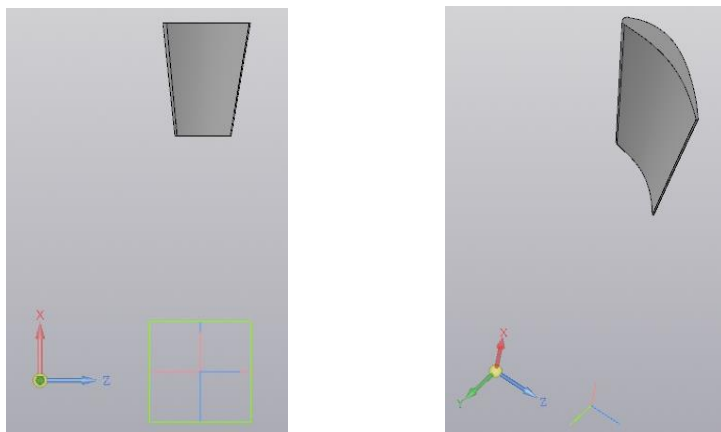


Рис. 1. Пери направляющей лопатки ТНД традиционной турбины.

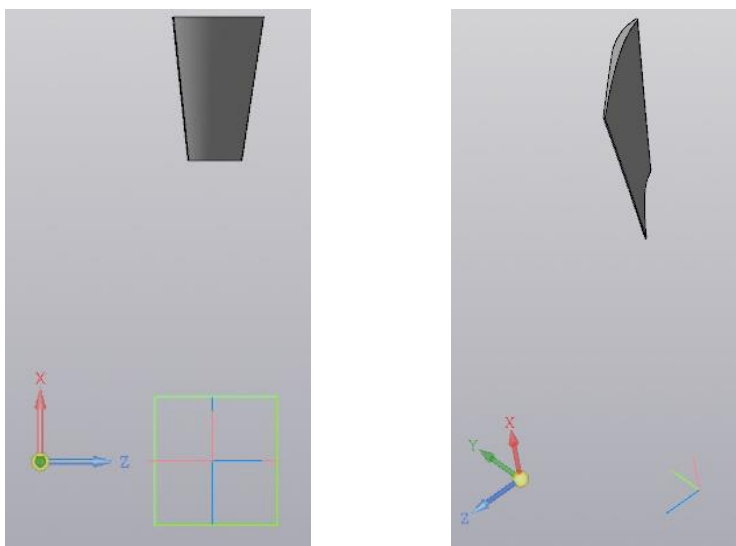


Рис. 2. Пери направляющей лопатки ТНД биротативной турбины.

В таблице 1 представлены основные численные значения сеточных моделей для расчета обтекания направляющей лопатки традиционного и биротативного типов.

Таблица 1. Численные значения расчетной сетки.

Тип турбины	Количество узлов	Количество элементов
Традиционная	521733	497280
Биротативная	525198	502600

В расчетной модели рабочим телом является идеальный газ. Используется модель турбулентности $k-\varepsilon$. Степень турбулентности на входе принята равной 15%, так как ТНД расположена за ТВД.

Используя результаты 2D оптимизационных расчетов, на номинальном режиме заданы значения параметров на входе в направляющий аппарат и на выходе из него на номинальном режиме.

Далее в программе ANSYS CFX, применяемой в качестве виртуального стенда [2], был выполнен проверочный 3D - газодинамический расчет обтекания направляющей лопатки ТНД двухступенчатой газовой турбины традиционного и биротативного типа. В программе ANSYS CFX моделировались пространственные течения в межлопаточных каналах направляющих лопаток, спрофилированных ранее в программе КОМПАС-3D.

Результаты исследований. Полученные в программе ANSYS CFX результаты обработаны для получения необходимых численных значений. В ходе расчетов в программе ANSYS CFX было выполнено осреднение по сечениям и получены основные результаты, приведенные в таблице 2.

Из-за меньших потерь в НА ТНД биротативного типа по сравнению с традиционной для пропуска заданного расхода требуется меньший перепад давлений и меньшие скорости газа.

Таблица 2. Результаты расчетов осреднения по сечениям.

Параметр	Традиционная турбина	Биротативная турбина
C_1 , м/с	477,7	467,0
P_0^* , Па	212384	206459
ζ_1	0,060	0,045

Анализируя основные результаты 3D испытаний на виртуальном стенде, можно сделать вывод о том, что значение коэффициента потерь ζ_1 в НА ТНД для биротативной турбины меньше на 1,5%, чем для традиционной, что совпадает с 2D результатами многорежимной компьютерной оптимизации, где эта величина на разных режимах составила 1...1,5% [1].

Заключение. Численный 3D эксперимент подтвердил, что переход к биротативной схеме газовой турбины для рассмотренного конкретного варианта турбовального двигателя является целесообразным.

ЛИТЕРАТУРА:

- Лапшин, К.Л. Многорежимная оптимизация биротативной газовой турбины турбовального двигателя// Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017.Т. 23. № 3. С. 144-152. DOI: 10.18721/JEST.230314.
- Нгуен А. К., Лапшин К. Л. Характеристики и структура потока турбинной ступени с отрицательным градиентом степени реактивности. Научно-технические ведомости СПбГПУ. СПб. Изд-во Политехнического университета. 2016. №2. с. 163–173.
- Атлас профилей решеток осевых турбин [текст]/Дейч М. Е., Филиппов Г. А., Лазарев Л. Я.// – М.: Машиностроение, 1965. – 96 с.

ПРИМЕНЕНИЕ ТУРБОДЕТАНДЕРНЫХ УСТАНОВОК ДЛЯ ЗАРЯДКИ
АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТРАНСПОРТА НА
ГАЗОРАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СТАНЦИЯХ

Актуальность. Энергетика России в значительной степени базируется на исчерпаемых источниках энергии, прежде всего углеводородах. Вызовы индустриализации, с учетом морального и физического износа производственных мощностей, приводят к существенному повышению цен на электроэнергию, следовательно, необходима реализация политики энергосбережения. Одним из основных используемых и экспортируемых энергоресурсов в нашей стране является природный газ. Из-за удаленности мест добычи газа от потребителя, его необходимо транспортировать на большие расстояния по магистральным газопроводам с высоким давлением, после чего он поступает на газораспределительные станции (ГРС) и газораспределительные пункты (ГРП) с давлением, значительно выше необходимого конечному потребителю. Для понижения давления используют дросселирование. Энергия избыточного давления газа при этом расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений, что является безвозвратной потерей. Выполненный в [1] анализ о практическом использовании различных источников энергии для объектов ПАО Газпром, позволяет сделать вывод, что для утилизации энергии избыточного давления природного газа турбодетандерные установки в наибольшей степени соответствуют политике энергосбережения, экономии материальных средств, и улучшения экологии.

Как и любой другой механизм, турбодетандеры не лишены недостатков. Их единичная мощность является избыточной для обеспечения нужд ГРС и ГРП, но недостаточной для районов крупных городов. Удаленность газораспределительных станций и газораспределительных пунктов от городов приводит к необходимости в строительстве дополнительных линий электропередач, и, как следствие удорожанию вырабатываемой электроэнергии. В связи с этим необходимо искать новые направления использования энергии турбодетандерных установок. Одним из таких направлений может быть зарядка аккумуляторных батарей электрического транспорта.

Цель. Целью данной работы является постановка задачи для оценки эффективности использования турбодетандерной установки на ГРС для зарядки аккумуляторных батарей электробусов.

Метод исследования. Исследуем актуальность применения аккумуляторных емкостей для городского транспорта.

Все развитые страны мира стремятся перейти с получения электроэнергии от ископаемых видов топлива к возобновляемым источникам энергии. Это подтверждается значительным увеличением доли вырабатываемой электроэнергии возобновляемыми источниками [2], а также увеличением финансирования данной отрасли [3]. Подобная тенденция связана с требованиями экологических норм, поиском источников энергии более выгодных с экономической точки зрения, истощением запасов углеводородов.

Острота экологической проблемы, связанной со сжиганием топлива и выбросом отработанных газов в атмосферу подтверждается прошедшим в июне 2015 года в Париже саммитом «Большой семерки» G7, а также сделанным в том же году докладом международного агентства возобновляемых источников энергии «International Renewable

Energy Agency». Страны-участники G7 пришли к консенсусу о снижении эмиссии парниковых газов (CO₂) с 37 Гт в год до 5 Гт в год к 2050 году [4].

Интернациональным агентством возобновляемых источников энергии был разработан план достижения означенной цели. Одной из его частей является развитие экологически чистого транспорта. На рисунке 1 представлен график энергопотребления на транспорте.

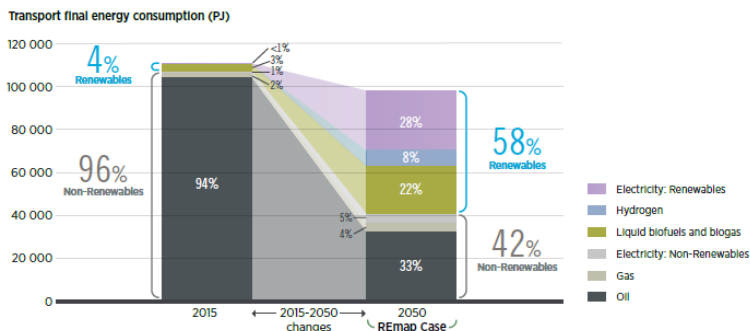


Рис.1. График энергопотребления на транспорте [5]

Одним из ключевых моментов решения экологического вопроса стало все более широкое применение электробусов. Электробус – общественный вид транспорта, использующий в качестве источника энергии электричество, а в качестве привода – электродвигатель. Китай, Швейцария и ряд других стран достигли наибольшего успеха в развитии и внедрении подобного вида транспорта.

В 2016 году в Китае было продано более 110 тысяч электробусов. На сегодняшний день городе Шэньчжэнь весь автобусный парк состоит из электробусов. В России только начинается внедрение экологически-чистого транспорта, чтобы не отставать от Китая и Европейских стран, необходимо развивать это направление. На сегодняшний день, городами, способными к закупке электробусов являются Москва и Санкт-Петербург.

Москва запланировала с 2021 года прекратить закупать дизельные автобусы для обеспечения перевозок на городских пассажирских маршрутах и сосредоточиться на закупке электробусов. На данный момент существует три типа электробусов – это электробусы с динамической подзарядкой, электробусы с ночной зарядкой и электробусы с быстрой подзарядкой. В конце 2017 года руководство Москвы в лице ГУП «Мосгортранс» объявило конкурс на поставку 300 электробусов (с 15-летним сервисным обслуживанием) и 98 ультрабыстрых зарядных станций для них. Правительство Москвы сосредоточилось на закупке электробусов с быстрой подзарядкой.

В Санкт-Петербурге правительство решило пойти по другому пути. С декабря 2017 года в Санкт-Петербурге были введены в эксплуатацию электробусы с динамической подзарядкой. Такой вид электробуса заряжается от проводов, а часть пути проходит, отсоединив штанговый токоприемник от контактной сети. Всего администрацией города было внедрено 115 новых машин. Пассажировместимость таких электробусов составляет 90-100 человек, а запас хода без проводов, при полной загрузке, примерно 7,5 км. 19 марта 2019 года на маршрут вышли 10 электробусов с ночной подзарядкой от компании «Волгабас». Их запас хода составляет 200-220 км при полной загрузке, до 90 человек пассажиров. Электробусы с ночной зарядкой наиболее эффективны, поскольку их запас хода соответствует среднедневному пробегу автобуса за смену, вследствие этого, не надо тратить

время на подзарядку в течение рабочей смены и средства на оборудование зарядных пунктов на маршруте.

Ряд других крупных городов России также внедряет электробусы в эксплуатацию.

Результат. Основным источником загрязнения в крупных городах является подвижный автотранспорт, по данным за 2013 год, доля загрязнения составляет 86,5 %. На сегодняшний день, в Санкт-Петербурге ежедневно выходят в рейс порядка 13 тысяч автобусов. Замена автобусов на электробусы поможет снизить выбросы загрязняющих веществ на 16,87 тыс. тонн в год. Потребление электроэнергии в день при этом составит $13\ 000 \cdot 300\ [\text{кВт} \cdot \text{ч}] = 3\ 900\ 000\ [\text{кВт} \cdot \text{ч}]$.

В СПбПУ Петра Великого, по заказу ООО «Газпром трансгаз Санкт-Петербург», с использованием возможностей промышленного партнера ООО «НТЦ «МТТ», уже разработана для газовой промышленности целая линейка микротурбодетандерных генераторов мощностью от 100 Вт до 30 кВт, используемых в качестве автономных локальных источника электрической энергии для ГРС и ГРП [6, 7]. В работе [6], на основе детальных газодинамических и прочностных расчётов обоснована возможность применения малорасходных турбин конструкции ЛПИ для создания автономных источников электрической энергии для собственных нужд газораспределительных станций газотранспортной системы России. При этом, на расходе природного газа 1500 м³/час и его редуцировании с 1,5 до 0,6 МПа вырабатывается мощность 20 кВт.

Вокруг Санкт-Петербурга располагается ряд крупных ГРС с большими расходами газа, например, Шоссейная – 729000 м³/час, Северная - 330000 м³/час и только на этих двух ГРС возможно размещение турбодетандерных мощностью более 14 тыс. кВт, что дает возможность выработки электроэнергии в количестве 338000 кВт·час. При увеличении используемого перепада давлений от 0,9 до 2,7 МПа эта величина утроится, то есть только на этих двух ГРС возможно покрытие трети потребностей электротранспорта в электрической энергии.

Предметом дальнейших исследований будет выбор и обоснование единичной мощности турбодетандерного генератора, его детальный расчет и проектирование.

Вывод. Не менее трети электроэнергии, необходимой для зарядки аккумуляторных батарей и накопителей для пассажирского электротранспорта может быть выработана с использованием турбодетандерных генераторов, смонтированные на ГРС и ГРП.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Фокин Г.А. Автономные источники электрической и тепловой энергии для магистральных газопроводов и газораспределительных станций. Монография. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. - 164 с.
2. The International Energy Agency: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.iea.org/renewables2018/>. (Дата обращения: 18.04.2019).
3. Hannah Ritchie and Max Roser. Renewable Energy: [Электронный ресурс]. URL: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>. (Дата обращения: 30.04.2019).
4. Wikimedia Foundation, Inc: [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org>. (Дата обращения: 08.05.2019).
5. International Renewable Energy Agency: [Электронный ресурс]. URL: <https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Global-Energy-Transition-A-Roadmap-to-2050>. (Дата обращения: 30.05.2019).
6. Н.А. Забелин, С.Н. Беседин, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин Применение малорасходных турбин конструкции ЛПИ в автономных источниках электрической энергии для газораспределительных станций магистральных газопроводов. Энергетик, 2015, №9, с. 50-55.
7. Н.А. Забелин, В.А. Рассохин, Г.А. Фокин. Концепция создания турбогенераторов, использующих энергию сжатого природного газа для собственных нужд газотранспортной системы РФ. В сб. «Изобретатели России в импортозамещении», Всероссийская конференция изобретателей 1-2 декабря 2017 года, Санкт-Петербург, 2018, с. 48-59.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ВИБРАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ РОТОРОВ ПАРОВЫХ ТУРБИН
РАСЧЕТНЫМИ МЕТОДАМИ

Введение. При конструировании и эксплуатации современных паротурбинных установок ТЭЦ и АЭС особое внимание уделяется вопросам вибрационной надежности ротора турбины. Вибрационная надежность ротора во многом определяется точностью расчетной оценки его критических скоростей [1].

Цель. Освоение и верификация методики расчета критических скоростей роторов турбин, основанной на использовании суперэлементов (СЭ).

Актуальность. Сегодня собственные частоты важнейших элементов турбины определяются в программных пакетах, использующих метод конечных элементов (КЭ) [2]. Этот алгоритм широко известен и позволяет получить результат с высокой точностью. Однако у метода КЭ имеется недостаток, затрудняющий его использование при расчете собственных частот всего валопровода паротурбинной установки. Указанный недостаток заключается в чрезмерно большом объеме вычислений. Использование метода СУ позволяет существенно сократить объем вычислений и делает возможным проведение расчетов критических скоростей валопровода на обычном компьютере [2, 3].

В настоящей работе выполнено сопоставление критических скоростей ротора, полученных в программных пакетах ANSYS WB и DyRoBeS. В первой из указанных программ реализован метод КЭ, во второй - метод СЭ.

На рис.1 приведены результаты модального анализа ротора ЦНД паровой турбины К-800-240, выполненного в программе ANSYS WB (количество КЭ = 9494).

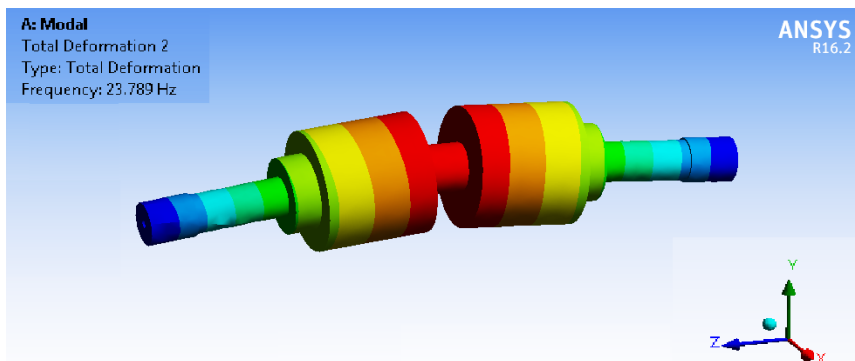


Рис. 1. Первая (безузловая) форма поперечных колебаний ротора, полученная в программе ANSYS. Частота колебаний составляет 23,79 Гц, жесткость подшипниковых опор $C=1 \cdot 10^9$ Н/м

На рис.2 приведены результаты модального анализа ротора ЦНД К-800-240, полученные в программе DyRoBeS (количество СЭ = 5).

Анализируя представленные в таблице 1 результаты расчета можно видеть, что частоты собственных колебаний ротора и соответствующие формы, найденные по двум указанным выше программам, довольно близки.

Critical Speed = 1426 rpm = 23.76 Hz

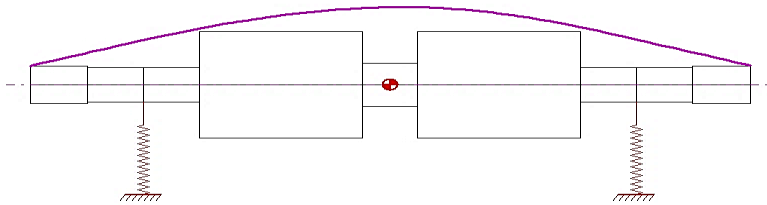


Рис. 2. Первая форма поперечных колебаний ротора, полученная в программе DyRoBeS. Частота колебаний 23,76 Гц, жесткость подшипниковых опор $C=1 \cdot 10^9$ Н/м

Таблица 1. Частоты и формы собственных колебаний ротора

Форма изгибных колебаний	Частота, Гц		%
	ANSYS	DyRoBeS	
Первая	23,79	23,76	0,1
Вторая	51,03	49,65	2,1

Помимо частот собственных форм колебаний, приведем также вибрационную диаграмму рассматриваемого ротора (рис. 3), на которой представлены зависимости его собственных частот от жесткости подшипников. Диаграмма построена по результатам расчетов в программах ANSYS и DyRoBeS. На диаграмме запрещенные области значений собственных ротора частот заштрихованы.

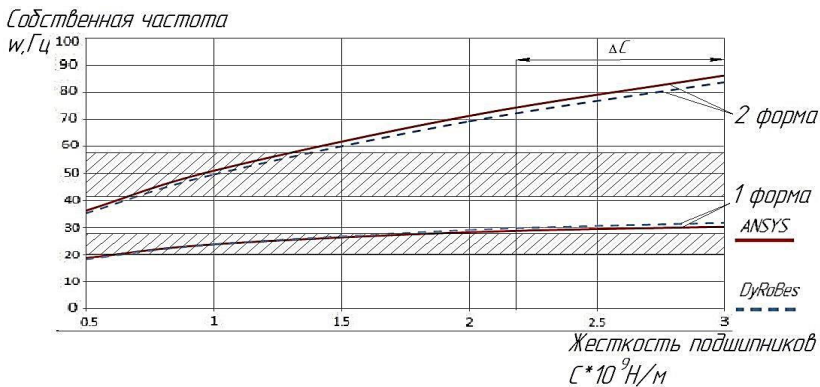


Рис. 3. Вибрационная диаграмма ротора ЦНД: по горизонтальной координате отложена жесткость подшипников; по вертикальной координате отложены частоты возбуждения и собственные частоты ротора

По полученной вибрационной диаграмме можно сделать вывод о том, что вибрационной отстройке ротора соответствуют жесткости опор от $2,2 \cdot 10^9$ до $3 \cdot 10^9$ Н/м.

Таким образом, в процессе анализа результатов расчетов в программных пакетах ANSYS и DyRoBeS были получены частоты собственных колебаний ротора, а также

значения жесткостей подшипниковых опор, обеспечивающие безопасную работу ротора цилиндра низкого давления.

Выводы. Проведено сопоставление результатов суперэлементного расчёта с результатами, полученными на конечно-элементной модели. Максимальное отклонение значений собственных частот ротора турбины не превышает 3%, что существенно меньше принимаемого обычно запаса вибрационной отстройки роторов в диапазоне $\pm 12\%$ [2]. При использовании метода СЭ существенно уменьшается время расчета и появляется возможность оценки собственных частот всего валопровода паротурбинной установки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Heinz B., Singh M. Steam Turbines—Design, Applications and Rerating // McGraw-Hill, New York. – 2009. – 414 p.
2. Костюк А.Г. Динамика и прочность турбомашин: учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 476 с.
3. Галанин М.П., Савенков Е.Б. Совместное использование метода конечных элементов и метода конечных суперэлементов, Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2004, №13.

УДК 621.444.4

А.И. Тараканова

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

СИСТЕМЫ ГЛУБОКОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Введение. Процесс ввода в работу комплексных систем глубокой утилизации тепла дизельных двигателей (КСГУТ) выступает одним из наиболее перспективных, также по причине, что он может быть полезен на судах практически любого типа, не учитывая их назначение, регион эксплуатации и возраст. Применение КСГУТ по данным компании MAN разрешает получить дополнительную электроэнергию в размере 5-7% мощности главного двигателя, что, по большей части, способен обеспечить необходимой потребляемой энергией судна на ходовом режиме [1].

Цель работы. Рассмотреть и проанализировать эффективность внедрения КСГУТ в машинное отделение судна и сделать выводы по полученным показателям.

В среднем на потребление тепла у судна расходуется 0,13...0,15 кг/кВт. Но утилизационный котел по паропроизводительности больше в 3,5...4,5 раза этих величин, поэтому, генерируемый в утилизационных котлах, пар идет не только на теплофикационные и хозяйственно-бытовые нужды, но и для снабжения и поддержания работы паротурбогенераторов и других турбоприводов. Удельный расход пара на турбогенератор лежит в диапазоне 8...14 кг/кВт [2].

Существуют комплексные системы глубокой утилизации теплоты (КСГУТ), включающие в себя утилизационный паровой котёл с контурами высокого и низкого давления, утилизационный паротурбогенератор, замещающий на ходовом режиме работы судна вспомогательный дизель-генератор, конденсатор и водоподогреватель, обеспечивающий подогрев воды утилизационного контура теплотой, отводимой с охлаждающей жидкостью дизельного двигателя. Комплексная утилизация тепловых потерь позволяет увеличить коэффициент использования тепла при сгорании топлива в двигателе более чем на 50%.

Использование энергии отходящих газов (ОГ) до настоящего времени являлась весьма отграниченной идеей для производства электроэнергии в утилизационных турбогенераторах

и для производства пара в утилизационных котлах (УК). Этому служило понижение температуры ОГ у судовых дизелей, по причине повышения эффективности преобразования энергии топлива в полезную работу и аналогичное увеличение определенных составляющих теплового баланса, как, например, теплота, отводимая с охлаждением двигателя, что, в результате, приводило к ограничению применения электрогенерирующих КСГУТ.

Форсирование малооборотных крейцкопфных дизелей по среднему эффективному давлению до 2 МПа и последующее увеличение температуры ОГ открыли новые возможности использования КСГУТ. Крупные зарубежные компании-производители судового оборудования, такие как MAN, Wartsila, Mitsubishi уже сейчас предлагают судовладельцам готовые комплексные решения судового энергетического оборудования (СЭУ) со КСГУТ на базе производимых ими главных двигателей [3].

В основе многих предлагаемых КСГУТ используют паросиловой цикл Ренкина. При этом, обеспечивается комплексное использование как тепловой, так и кинетической энергии отработавших газов за счёт применения утилизационного парового котла и паровой турбины, совмещённой с турбогенератором, работающим на отработавших газах главного двигателя (ГД). Ряд технических решений предусматривает полезное использование низкопотенциальной теплоты таких вторичных энергетических ресурсов (ВЭР) как теплота, отводимая с охлаждением двигателя и охлаждение наддувочного воздуха (ОНВ). Указанная теплота может использоваться для подогрева питательной воды, используемой в паросиловом контуре.

Гибридный турбокомпрессор (ТК) МЕТ42МА, разработанный при участии фирмы «Mitsubishi», представленный на рисунке 1, предназначен для двигателей мощностью от 3500 до 5200 кВт, имеет генератор максимальной мощности 252 кВт, с вырабатываемой электрической энергией 4,8-7,2 % мощности двигателя [4].

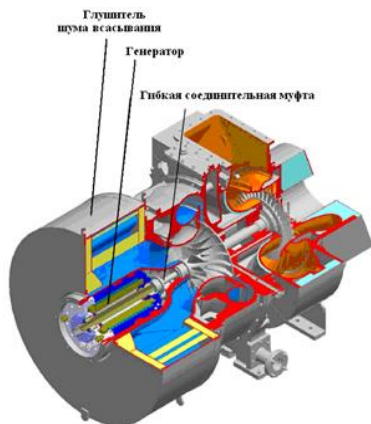


Рис. 1. Гибридный турбокомпрессор агрегата наддува МЕТ42МАГ с встроенным электрогенератором

Гибридные ТК имеют ряд преимуществ:

1. Устранение трубопроводов и клапанов для подачи газа в силовую турбину (СТ);
2. Управление характеристикой турбокомпрессора увеличением или снижением мощности генератора;
3. Использование генератора в качестве мотора вместо вспомогательной воздуходувки

для двухтактных двигателей;

4. Высокий КПД.

Информации о стоимости турбокомпаундных систем с гибридными ТК и сроках их окупаемости для указанного диапазона мощности пока нет. Но возможность получения дополнительной мощности в количестве 3—7 % свидетельствует о целесообразности их использования. Рентабельность окупается агрегатной мощностью установки, с учетом того, что чем она больше, тем больше выигрыш. Именно поэтому впервые она появилась на больших двухтактных судовых дизелях и крупных дизель-генераторных станциях на суше [5].

Принципиальная схема турбокомпаундной системы полной утилизации тепла от компании Wartsila дана на рисунке 2.

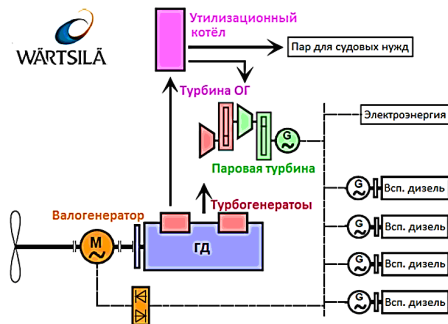


Рис. 2. Схема КСГУТ компании Wartsila, содержащая силовую газовую и паровую утилизационные турбины

Она состоит из силовой газовой и паровой турбин, соединенных между собой редукторами и мотор-генератора.

Силовая турбина приводится отходящими газами, частично отбираемые от основного потока. Паровая турбина использует пар, поступающий из котла-утилизатора, нагреваемого ОГ после выхода из ТК главного двигателя. Безредукторный мотор-генератор на валопроводе главного двигателя включен в общую систему электрообеспечения со вспомогательными дизель-генераторами. Мотор-генератор может работать как двигатель, передавая дополнительную мощность на винт при маневрировании и неблагоприятной погоде или волнении на море, или как генератор, передающий энергию различным бортовым потребителям, например, холодильным камерам рефрижератора [6].

Фирма АВВ произвела расчетную оценку увеличения мощности судовой установки с двигателем мощностью 69 МВт и отводом на силовую турбину 10,7 % отработавших газов для систем утилизации только силовой турбиной и паровой турбины и при совместном их использовании. С учетом режима работы судна фирма оценила годовую экономию топлива и срок окупаемости установки КСГУТ. Для установки с силовой турбиной срок окупаемости составил 1,5 года, с паровой — 11,5 лет и при совместном их использовании — около 4,5 лет. [7].

Вывод. Комплексная утилизация тепловых потерь способствует повышению коэффициента использования тепла при сгорании топлива в двигателе более чем на 50%.

Применение КСГУТ по данным компании MAN позволяет получить дополнительную электроэнергию в размере 5-7% мощности главного двигателя, что, в ряде случаев, удовлетворяет потребность судна в электроэнергии на ходовом режиме.

Однако применение таких систем утилизации вряд ли целесообразно из-за сложности

систем, их больших массогабаритных показателях, относительно больших капиталовложений и сокращения эффективности при утилизации вторичных энергетических ресурсов относительно маломощных, по сравнению с морскими, главных и вспомогательных судовых двигателей внутреннего и смешанного река-море плавания.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ohtsu M., Shimada K. Utilization of Excessive Turbocharger Efficiency. Paper № 123, CIMAC 2007, Vienna
2. Ларионов И.Д., Беляев И.Г. Вспомогательные парозенергетические установки теплоходов. –М.: Транспорт, 1977, 214 с.
3. Tigges K. High efficient combination of 2-stroke direct propulsion drives with Diesel-Electric drives via recovery of thermal energy. Paper № 72, CIMAC 2007, Vienna
4. Brunner H. Sulzer Low Speed Engines State of the Art. Paper № 213, CIMAC 2004, Kyoto
5. Ципленкин Г.Е., Дейч Р.С., Иовлев В.И. Турбокомпаундные системы как средство утилизации отходящего тепла силовых установок с ДВС. Двигателестроение, №1, 2009, с. 28-34
6. Holtbecker R., Welsser G., Amoser M. Taking the next steps in emissions reduction for large 2-stroke engines. Paper № 165, CIMAC 2007, Vienna
7. Katsumi M., Nakano R. Ymamoto T. and other. The evolution of MACH-30G toward the more efficient gas engine. Paper № 86, CIMAC 2007, Vienna

СОДЕРЖАНИЕ

Секция «Высоковольтная энергетика»

<i>Вишняков А.В., Готоуллин И.Р., Дегтярев И.А., Селищеников Д.А.</i> Разработка источника питания постоянного тока от электромагнитного поля линии электропередачи.....	3
<i>Волошин К.В., Титков В.В., Бочаров Ю.Н.</i> Исследование электродов с закругленными кромками	5
<i>Гулов А.М., Кольчев А.В.</i> Исследование энергетических воздействий на ОПН-110 кВ с внешним искровым промежутком	8
<i>Даутов А.А., Хафизов Д.И.</i> Разработка алгоритма устройства АРПМ на комплексе реального времени ПТК «RTDS».....	11
<i>Каракчиев П.В., Шикова Т.М.</i> Расчёт технологических напряжений в поперечном сечении проводников с твердой изоляцией при охлаждении	15
<i>Кибирев А.Е., Камалов А.М., Борисова М.Э., Диденко А.Л.</i> Влияние жесткости молекул полиимидов на стабильность электретного состояния	18
<i>Крылов М.С., Сахно Л.И.</i> Схема замещения трансформатора с двумя первичными и одной вторичной обмотками	21
<i>Нуев В.Ф.</i> Рентгенография как способ эффективного и быстрого обследования элементов ветроэлектрической установки	24
<i>Павлов А.А., Камалов А.М., Борисова М.Э., Малафеев К.В., Юдин В.Е.</i> Электретные свойства композиционного материала на основе полилактида	27
<i>Хафизов Д.И., Даутов А.А.</i> Разработка программы управления установкой для диагностики медно-титановых стержней	30
<i>Шейко А.Е., Васильева О.А.</i> Учет несинусоидальности тока при выборе сечения кабеля в системах электроснабжения 0,4 кВ.....	33

Секция «Электроэнергетические системы»

<i>Попков Е.Н., Фешин А.О.</i> Выпрямительный блок ветрогенератора с возбуждением от постоянных магнитов.....	36
<i>Перико Е.А.</i> Комбинированное заземление нейтрали в воздушных и кабельно-воздушных сетях для исключения смещения нейтрали и упрощения поиска места повреждения при ОЗЗ.....	39
<i>Попов И.В., Стоткин А.В., Евдокунин Г.А.</i> Компьютерное моделирование магнитных полей трансформаторов в переходных режимах	42
<i>Денисенко А.И., Лямов А.С.</i> Характеристики мощности электропередачи с устройством FACTS последовательного включения	45
<i>Денисенко А.И., Акимов Д.А.</i> Оценка эффективности использования систем накопления электроэнергии в различных ценовых категориях	47
<i>Триандофилиди И.А., Юрганов А.А.</i> Метод эквивалентирования внешней электрической сети станции	50
<i>Стоткин А.В., Попов И.В., Евдокунин Г.А.</i> Расчет высокочастотных параметров заземлителей с помощью программного комплекса Comsol Multiphysics	53
<i>Чепелкина А.И., Люлина М.А., Першиков Г.А.</i> Исследование влияния системы автоматического регулирования возбуждения на крутильные колебания валопроводов мощных турбоагрегатов	56
<i>Китаевич Ф.А., Юрганов А.А.</i> Модернизация комплекса для проверки и наладки систем автоматического регулирования возбуждения синхронных машин	58
<i>Шкитина Н.О., Акимов Д.А., Волтов И.П.</i> Оценка возможности использования нормального распределения для моделирования стохастической нагрузки от электромобилей на распределительную сеть	60
<i>Рябинина М.К., Кузнецов А.А.</i> Парадоксы влияния уровней напряжения на оплату электроэнергии	63
<i>Головина А.В., Беляев А.Н.</i> Статическая устойчивость дальних линий электропередачи сверхвысокого напряжения	67

<i>Шагалиева А.И., Беляев А.Н.</i> Оптимизация режимов работы дальних линий электропередачи с устройствами продольной емкостной компенсации	70
<i>Деверилин Д.Д., Акимов Д.А.</i> Оценка использования модели конечных состояний для решения задачи дезагрегации современной электрической нагрузки.....	72
<i>Кузнецова М.Н., Иванов С.А.</i> Реконструкция распределительных пунктов 6-20 кВ на базе релюзеров	75
<i>Разинкова А.Д., Беляев А.Н.</i> Применение систем СМПР для повышения наблюдаемости и управляемости крупных энергообъединений	77
<i>Родионова А.С.</i> Анализ работы и устойчивости сверхдлинных линий электропередачи с управляемой шунтирующей компенсацией.....	80
<i>Тимофеев М.Н., Пичхидзе С.Я.</i> Характеристика энергосистемы Саратовской области и перспективы применения технологии интеллектуальной электрической сети.....	83
<i>Аренков А.В., Скорняков В.А.</i> Проблемы использования конденсаторных батарей для компенсации реактивной мощности в системах энергоснабжения с преобразовательными устройствами	86
<i>Черников И.С., Мурашов Ю.В.</i> Разработка модели устройства индукционного нагрева для системы отопления частного дома.....	88
<i>Чистяков А.С., Чусов А.Н., Савельева И.С., Грачев С.Ю.</i> Разработка математической модели дугового разряда с учетом деформации в мультикамерном разряднике	91
<i>Гольшев Д.А., Грачев С.Ю., Веселовский А.П., Зеверев С.Г.</i> Зажигание плазмы в ВЧИ-плазмотроне воздушным трансформатором	94
<i>Харламова К.В., Мурашов Ю.В.</i> Разработка бытового индукционного проточного водонагревателя мощностью 3 кВт	97
<i>Иенашин О.Э.</i> Электро-преобразовательная система отопления жилых зданий	100
<i>Черенков В.А., Иванов Д.В., Фролов В.Я.</i> Сравнительный анализ отключающей способности вакуумной дугогасительной камеры 10 кВ, 20 кА с аксиальным и радиальным магнитным полем ...	103
<i>Куценко А.В., Коробейников П.В.</i> Перспективы развития КРУ и их особенности.....	107
<i>Парамонов Е.Д., Бельский Р.А., Савельева И.С.</i> Повышение отключающей способности мультикамерных разрядников.....	109
<i>Петров Г.Н., Мурашов Ю.В.</i> Исследование энергетической эффективности солнечного трекера.....	111
<i>Рогожина А.А., Чусов А.Н., Савельева И.С., Грачев С.Ю.</i> Разработка и валидация математической модели дугового разряда в мультикамерном разряднике	113
<i>Ставицкий А.В.</i> Разработка системы управления и автоматика вентилятора главного проветривания.....	116
<i>Мукашева Ж., Стоищ В.З., Тарасов К.Д., Фролов В.Я.</i> Обоснование выбора концепции цифровой подстанции 110 кВ.....	119

Секция «Атомная и тепловая энергетика»

<i>Aksenov P.L., Egorov M.Yu.</i> Definition of initiating event category applying PRA methods	122
<i>Бабич А.Ю., Зайнуллина Э.Р., Сучок В.В.</i> Исследование теплообмена при конденсации водяного пара на внутренней поверхности трубы методом градиентной теплотметрии	124
<i>Балачков М.М., Юрченко М.Д.</i> Нейтронно-физический расчёт ядерного реактора типа ВК с помощью итерационного метода	127
<i>Егоров М.Ю., Кондрашов А.В.</i> Сравнительная эффективность применения теплового насоса с системой утилизации теплоты конденсации для отопления ледовых арен	130
<i>Ивков М.И., Парамонова И.Л., Агафонова Н.Д.</i> Расчетный анализ режима с разрывом трубопровода питательной воды с применением статистического анализа неопределенностей для обоснования безопасности РУ с ВВЭР.....	132
<i>Калмыков К.С., Налетов И.Д., Аникина И.Д.</i> Эффективность использования теплонасосных установок различных компоновок в реальных паротурбинных энергоблоках с турбинами ПТ-80 и Т-250.....	134
<i>Касаткин И.И., Егоров М.Ю.</i> Повышение эффективности сепарации пара в сепараторах-пароперегревателях турбин АЭС.....	138

<i>Вольский А.В., Колбанцев Ю.А., Коноушин М.В.</i> Анализ влияния учета кривых КПД отсека последней ступени паровой турбины при имитационном моделировании тепловой схемы ПТУ К-1200-6,8/50.....	141
<i>Колосова Н.В., Аникина И.Д.</i> Совместная эксплуатация теплонасосной установки и паровой турбины типа Т-250/300-240	143
<i>Коноушин М.В., Николаенков Д.А., Назибин А.А.</i> Анализ методик нейтронно-физических расчетов водо-водяных ядерных реакторов со сверхкритическими параметрами теплоносителя	146
<i>Костюченко К.С.</i> Использование метода СВ-синтеза при получении интерметаллидных матриц для дисперсионного ядерного топлива.....	149
<i>Молоскин А.Е., Парамонова И.Л.</i> Обоснование подкритичности корнума в устройстве локализации расплава для стационарной топливной загрузки ВВЭР.....	152
<i>Мунтяну Д.В., Каравашкин Н.Р., Ямашкин М.В., Садеги Х., Соколова Е.А.</i> Сравнительный технико-экономический анализ методов опреснения в составе АЭС Бушер (Иран).....	155
<i>Налетов И.Д., Калмыков К.С., Аникина И.Д.</i> Эффективность использования теплонасосной установки на различных хладагентах в реальных паротурбинных энергоблоках	158
<i>Налетов И.Д., Амосов Н.Т.</i> Методика обезвреживания и утилизации особо опасных и токсичных отходов полигона «Красный Бор».....	161
<i>Павлов А.В., Бобылев П.Г., Митяков В.Ю.</i> Создание и градуировка первичных преобразователей на основе композиции медь-никель	164
<i>Peksen B., Ucar S., Beki E., Paramonov I.L.</i> Assessment of temperature distributions for microcell UO ₂ pellets and high-density composite pellets accident tolerant fuel.....	167
<i>Peksen B., Ucar S., Beki E., Paramonov A.P.</i> Numerical analysis of fuel rods under reactivity initiated accident.....	169
<i>Пивоварова М.В., Амосов Н.Т.</i> Исследование воздействия на окружающую среду продуктов сгорания водомазутных эмульсий.....	172
<i>Трецев Д.А., Поздеева Д.Л.</i> Обоснование возможности получение тепловой и электрической энергии путем утилизации твердых бытовых отходов на ТЭЦ г. Санкт-Петербурга	175
<i>Рузич Е.Н., Киселев В.Г., Попков В.В.</i> Влияние электроизолирующих фланцев на коррозию теплопроводов	178
<i>Селезнев Н.А., Коноушин М.В., Шепенева Е.А.</i> Разработка методики взаимодействия специалистов при решении задач по выполнению требований по эвакуации персонала атомных электростанций.....	180
<i>Власов А.В., Сучок В.В., Жидков Н.А., Сериштанов В.В.</i> Градиентная теплотметрия и PIV в исследовании теплообмена и течения вблизи пары цилиндров.....	183
<i>Сидоров Н.М., Ившин А.В., Новикова О.В.</i> Соответствие радионуклидного состава облученного графита уран-графитовых реакторов критериям приемлемости при транспортировании радиоактивных материалов.....	186
<i>Аль-Зувайни Х.М., Скулкин С.В.</i> Экспериментальное исследование геотермального кондиционирования воздуха в странах Среднего Востока	188
<i>Patil A.A., Sokolova E.A.</i> Dry anaerobic digestion technique for biogas production and the diaphragm pump applications	191
<i>Patil A.A., Sokolova E.A.</i> Generating electricity through pedal power by using various drives and calculating power according to generator specifications.....	193
<i>Степанов И.А., Федорович Е.Д., Ившин А.В.</i> К вопросу о выборе конструкции транспортного контейнера для вывоза облученного графитового замедлителя с площадок АЭС с реакторами типа РБМК на этапе их вывода из эксплуатации.....	196
<i>Владимиров Я.А., Новикова О.В., Сериштанов В.В., Сучок В.В.</i> Причины ухудшения качества горячей воды в открытой системе водоснабжения города Кировска	198
<i>Владимиров Я.А., Новикова О.В., Сериштанов В.В., Сучок В.В.</i> Совершенствование технологии подготовки сетевой воды в системе теплоснабжения города Кировска.....	201
<i>Зайнуллина Э.Р., Бабиц А.Ю., Павлов А.В., Митяков В.Ю.</i> Исследование теплообмена при конденсации методом градиентной теплотметрии.....	204

Секция «Энергетическое машиностроение»

<i>Антонова Ю.А., Жарковский А.А.</i> Влияние размеров спирального отвода на характеристики центробежного насоса.....	208
<i>Эбов В.Э., Борцев И.О.</i> Разработка и оптимизация 3D модели конструкции насоса типа VS4.....	210
<i>Горбатов Д.А., Свобода Д.Г., Жарковский А.А.</i> Оптимизация проточной части насоса типа Д с использованием метода ЛП-тау поиска.....	213
<i>Иванов А.А., Иванов С.В., Семёнова А.В.</i> Определение максимальных напряжений вала гидротурбины.....	216
<i>Иванов О.А., Борцев И.О.</i> Цифровое моделирование клиновой задвижки.....	219
<i>Иванов О.А., Жарковский А.А.</i> Возможность использования дискового рабочего колеса в погружном нефтяном насосе.....	221
<i>Клименко Ф.Н.</i> Создание прототипа рабочего колеса осевого насоса, совмещенного с якорем электродвигателя методом послойного наплавления.....	224
<i>Клюев А.С., Иванов Е.А., Чернышев Я.И.</i> Верификация методики численного расчёта струйного насоса.....	227
<i>Константинова В.И., Борцев И.О.</i> Расчет гидравлических потерь в элементах сети водоснабжения эмпирическим и численным методами.....	230
<i>Коткас Л.А., Донской А.С., Жарковский А.А.</i> Экспериментальное исследование статических характеристик пневматического мускула.....	233
<i>Стасев А.А., Чернышев Я.И., Николаев А.В., Клюев А.С.</i> Применение программных пакетов с открытыми исходными кодами для цифрового моделирования гидравлических машин.....	236
<i>Журкин Н.А., Коткас Л.А., Донской А.С.</i> Моделирование пневматического мускула в среде ANSYS Mechanical APDL.....	238
<i>Журкин Н.А., Коткас Л.А.</i> Математическое моделирование пневматического привода в среде MATLAB Simulink.....	242
<i>Журкин Н.А., Жарковский А.А.</i> Математическое моделирование пневмоприводного насоса высокого давления с tandemным приводом.....	245
<i>Григорьев А.В., Гальшев Ю.В.</i> Формирование характеристики впрыска для дизельного двигателя мощностью 140 кВт.....	248
<i>Васильев Д.А., Гальшев Ю.В.</i> Исследование влияния параметров зажигания на рабочий процесс двигателя, работающего на обедненной газовой смеси.....	251
<i>Петров А.Ю., Гилева Л.В.</i> Исследование характеристики работы антипомпажного клапана с помощью численного моделирования.....	254
<i>Кретинин К.И., Кожухов Ю.В., Карташов С.В., Иванов В.М.</i> Сравнение результата расчета характеристик двухступенчатого центробежного компрессора природного газа по аналитическому методу расчета и методом вычислительной газодинамики CFD.....	257
<i>Рыбин Е.И., Соболев В.А., Лебедев А.А.</i> Комбинированная энергетическая установка с компрессорным наддувом.....	259
<i>Семенов А.Д., Чубук А.Р., Лебедев А.А.</i> Проектирование многоступенчатой компрессорной установки внешнего сжатия.....	262
<i>Фатеева Е.С., Садовский Н.И., Кожухов Ю.В., Зайцева Е.С., Тузова Н.М.</i> Проектный расчет и анализ рабочего процесса завода по сжижению природного газа производительностью 2000 тыс. т. в год.....	265
<i>Янин И.С., Окунев В.М., Березовский А.А.</i> Оптимизация геометрии обратного направляющего аппарата малорасходных ступеней центробежного компрессора.....	268
<i>Зайцева Е.С., Тузова Н.М., Фатеева Е.С., Данилишин А.М.</i> Анализ расчета вязкого трехмерного потока в лабиринтном уплотнении у основного диска центробежного компрессора.....	270
<i>Толокнова И.С., Лебедев А.А.</i> Оценочный выбор наиболее подходящего материала мембраны для мембранного компрессора высокого давления.....	272
<i>Дзюбан Р.В., Рубцов И.С., Смирнов М.В.</i> Сравнение различных конструкций рабочих колес для турбодетандера мощностью 1 кВт.....	275

<i>Гребенников В.В., Лебедев А.Р.</i> Эффективность применения турбодетандерных установок для обеспечения собственных нужд компрессорных станций.....	277
<i>Гребенников В.В., Рассохин В.А.</i> Оптимальная тепловая схема для судовой паротурбинной установки мощностью 24 МВт.....	280
<i>Коленько Г.С., Ласкин А.С.</i> Влияние основных геометрических соотношений осевой турбинной ступени на амплитуды и фазы переменных аэродинамических нагрузок на рабочие лопатки.....	283
<i>Лаптев М.А., Мякишев Н.С., Барсков В.В., Рассохин В.А.</i> Регенеративная ГТУ с двухступенчатым сжатием и расширением рабочего тела.....	287
<i>Masranov S.N., Bogov I.A., Sukhanov V.A.</i> Experimental research in possibilities of quality improvement of burning processes in burners of turbines.....	289
<i>Чумакова А.А., Нгуен А.К., Лапишин К.Л.</i> Сравнение потерь в направляющем аппарате турбины низкого давления в традиционной и биротативной схемах.....	291
<i>Пекарский А.Г., Забелин Н.А., Фокин Г.А.</i> Применение турбодетандерных установок для зарядки аккумуляторных батарей электрического транспорта на газораспределительных станциях.....	294
<i>Шабайлов С.А., Суханов А.И.</i> Обеспечение вибрационной надежности роторов паровых турбин расчетными методами.....	297
<i>Тараканова А.И.</i> Системы глубокой утилизации тепла отходящих газов дизельных двигателей.....	299

НЕДЕЛЯ НАУКИ СПбПУ

Материалы научной конференции
с международным участием

18–23 ноября 2019 года

ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
ОК 005-93, т. 2; 95 3004 – научная и производственная литература

Подписано в печать 08.05.2020. Формат 60×84/16. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 19,25. Тираж 20. Заказ 0785.

Отпечатано с готового оригинал-макета,
предоставленного организационным комитетом конференции,
в Издательско-полиграфическом центре Политехнического университета.
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
Тел.: (812) 552-77-17; 550-40-14.