

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 9 № 2

**Севастополь
2023**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2023. – Т. 9. - № 2. – 140 с.: ил.**

В научный журнал «Энергетические установки и технологии», включены статьи, посвященные актуальным вопросам современной энергетики. Журнал состоит из разделов: тепловые и ядерные энергетические установки, электротехнические комплексы и системы, экологическая безопасность, химические технологии атомных станций, информационные технологии в энергетике, моделирование физических процессов, физика в ядерной энергетике, автоматизация процессов контроля и управления, судовые энергетические установки, холодильные установки, гидравлические энергоустановки, компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Предназначен для научных работников, инженеров и специалистов, работающих на предприятиях и в организациях энергетики, аспирантов и студентов технических вузов. Журнал выходит 4 раза в год.

Редакционная коллегия:

Якимович Б.А. (главный редактор), д.т.н., профессор;
Губарев Ф.А. (заместитель главного редактора), д.т.н., профессор;
Черкашина Н.И. (ответственный секретарь), к.т.н., доцент;
Кочнов О.Ю., д.т.н., профессор; *Федоровский К.Ю.*, д.т.н., профессор;
Копп В.Я., д.т.н., профессор; *Яковлев Л.А.*, д.х.н., профессор;
Олейников А.М., д.т.н., профессор; *Завьялов В.М.*, д.т.н., профессор;
Высоцкий В.Е., д.т.н., профессор; *Омельчук Ю.А.*, к.х.н., доцент;
Матузаев К.Б., к.т.н., доцент; *Скидан А.А.*, к.т.н., доцент;
Губин В.Е., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И.*, к.т.н., доцент;
Магдыч Е.А., к.т.н., доцент; *Кучерик Г.В.*, к.т.н., доцент;
Браславский Ю.В., к.т.н., доцент; *Кузнецов П.Н.*, к.т.н., доцент;
Козырь Д.А., к.т.н., доцент;

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет».
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053, Российская Федерация

Рекомендован к печати Ученым советом ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи,
информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	7
<i>Лысцов С.О., Соколов В.В.</i> О расчетных параметрах наружного воздуха для систем кондиционирования воздуха атомных станций	7
<i>Литвиненко В.П.</i> Концептуальная оценка результатов исследований по оптимизации использования тепловой энергии в судовых дизелях, работающих по комбинированному циклу	16
<i>Муреева К.В., Коляденкова В.М.</i> Жидкосолевой реактор	26
<i>Шаповаленко В.В., Павлова И.А., Худякова В.А.</i> Методы и подходы в обеспечении качественной подготовки в области ядерной энергетики	30
Электротехнические комплексы и системы	37
<i>Веселова Н.М., Карапузов В.И., Черноусова М.А., Комиссаров Г.В.</i> Применение блокчейна в сотовой энергетике	37
<i>Канов Л.Н., Конева С.А., Пронина А.К., Хомак Е.Н.</i> Анализ эксплуатационных режимов систем электроснабжения с распределенной генерацией и потреблением	44
<i>Малюк Е.Г.</i> Устранение влияния устройств плавного пуска асинхронных двигателей на спектральный состав напряжения питающей сети	54
<i>Шайтор Н.М., Гортинченко А.В.</i> Системный подход к продлению жизненного цикла асинхронных двигателей	61
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	70
<i>Аль-Руфайи Ф.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.</i> Моделирование пьезоэлектрического элемента для генерации электрической энергии	70
<i>Кувшинов В.В., Касницкий А.Д., Власов Н.А., Артеменко И.Д., Березняк В.А.</i> Комбинированные системы солнечного энергоснабжения, совмещенных с конструкциями зданий и сооружений	75
<i>Олейников А.М., Червинский В.Л., Якимович Б.А., Эктор Эдуардо Роа</i> Некоторые подходы к расчету, конструированию и изготовлению ветрогенераторов с различной магнитной системой	79
<i>Чепенюк А.А., Бахтина Н.В., Борисов Б.Е., Меджитов М.Р., Жильцов А.С.</i> Использование фотоэлектрических преобразователей для обеспечения промышленных объектов	87
Химические технологии	93
<i>Толокольников А.А., Калтаев А.Ж., Губин А.В., Горишков А.С., Асильбеков А.К., Ларионов К.Б.</i> Исследование процесса совместного сжигания низкоректорного ископаемого топлива с древесным углем	93
<i>Турянский В.А.</i> Сорбционные свойства диоксида кремния, полученного на основе вскрышных пород	101
<i>Федорова С.А.</i> Использование магнитного поля для очистки технологических сред	114
Экологическая безопасность	120
<i>Шарифулина А.Р., Заблоцкая Е.В.</i> Анализ природоохранной деятельности филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская АЭС»	120

Информационные технологии в энергетике	126
<i>Егорова А.О., Сагалаев А.В., Филатов Р.А.</i> Технологии использования псевдослучайных последовательностей	126
<i>Свириденко И.И., Свириденко Д.И.</i> Надводный беспилотный аппарат для противодействия морским пиратам	131
Физика в ядерной энергетике	136
<i>Мирошниченко Е.В.</i> Применение программного комплекса «Laboratory Simulations» для исследования действия силы трения на криволинейной Траектории	136
Для авторов	139

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	7
<i>Lystsov S.O., Sokolov V.V.</i> On design parameters of outdoor air for air conditioning systems of nuclear power plants	7
<i>Litvinenko V.P.</i> Conceptual evaluation of the results of research on optimization of thermal energy conversion in marine diesel engines operating on a combined cycle	16
<i>Mureeva K.V., Koliadenkova V.M.</i> Molten salt reactor	26
<i>Shapovalenko V.V., Pavlova I.A., Khudyakova V.A.</i> Methods and approaches in providing high-quality training in the field of nuclear energy	30
Electrotechnical complexes and systems	37
<i>Veselova N.M., Karapuzov V.I., Chernousova M.A., Komissarov G.V.</i> The use of block chain for cellular energy	37
<i>Kanov L.N., Koneva S.A., Pronina A.K., Hodak E.N.</i> Analysis of the operating modes systems of electric supply with the up-diffused generation and consumption	44
<i>Malyuk E.G.</i> Elimination of the influence of asynchronous motor soft starters on the spectral composition of the supply voltage of the network	54
<i>Shaytor N.M., Gorpichenko A.V.</i> A systematic approach to extending the life cycle of asynchronous motors	61
Alternative and renewable energy sources	70
<i>Al-Rufae F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.</i> Modeling a piezoelectric element to generate electrical voltage	70
<i>Kuvshinov V.V., Timan D.I., Kasnitsky A.D., Vlasov N.A., Artemenko I.D.</i> Combined systems of solar energy supply combined with the structures of buildings and structures	75
<i>Oleinikov A.M., Chervinsky V.L., Yakimovich B.A., Hector Eduardo Roa</i> Some approaches to the calculation, design and manufacture of wind turbines with different magnetic systems	79
<i>Chepenyuk A.A., Bakhtina N.V., Borisov B.E., Medzhitov M.R., Zhiltsov A.S.</i> The use of photovoltaic converters to provide industrial facilities	87
Chemical technologies	93
<i>Tolokolnikov A.A., Kaltaev A.Zh., Gubin A.V., Gorshkov A.S., Asilbekov A.K., Larionov K.B.</i> Co-combustion processes of low-reactivity fossil fuels with charcoal	93
<i>Turyansky V.A.</i> Sorption properties of silicon dioxide derived from overburden rocks	101
<i>Fedorova S.A.</i> Using the magnetic field to clean process media	114
Environmental safety	120
<i>Sharifulina A.R., Zablotzkaya E.V.</i> Analysis of environmental protection activities of the Kalininskaya NPP branch of Concern Ros-Energoatom JSC	120
Information technologies in the energy sector	126
<i>Egorova A.O., Sagalaev A.V., Filatov R.A.</i> Technologies of use pseudo-random sequences	126

<i>Sviridenko I.I., Sviridenko D.I.</i> Surface unmanned vehicle to counter sea pirates	131
Physics in nuclear power engineering	136
<i>Miroshnichenko E.V.</i> Application of the software package "Laboratory Simulations" to study the action of the friction force on a curvilinear trajectory	136
For cars	139

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 697.911

О расчетных параметрах наружного воздуха для систем кондиционирования воздуха атомных станций

С.О. Лысцов¹, В.В. Соколов²

¹ АО «ЭО «ЗАЭС», г. Энергодар, 271503, Россия, lyszovsergey@gmail.com

² Севастопольский государственный университет, ул. Университетская 33, 299053, Севастополь, Россия, krater1210@mail.ru

Статья поступила 10.05.2023 г.; после доработки 11.05.2023 г.

Аннотация

Разработана методика определения возможных параметров наружного воздуха для систем кондиционирования воздуха с использованием архивов наблюдений ближайшей метеостанции. Разработаны практические рекомендации по включению в технические задания на разработку ПСД модернизации систем кондиционирования воздуха, на закупку центральных кондиционеров для атомных электростанций.

Ключевые слова: центральные кондиционеры, атомные станции, наружный воздух.

On design parameters of outdoor air for air conditioning systems of nuclear power plants

S.O. Lystsov¹, V.V. Sokolov²

¹ JSC EN "ZAES", city Energodar, 271503, Russia, lyszovsergey@gmail.com

² Sevastopol State University, st. Universitetskaya 33, 299053, Sevastopol, Russia, krater1210@mail.ru

Received 10.05.2023 y.; received in final form 11.05.2023 y.

Annotation

A technique has been developed for determining the possible parameters of outdoor air for air conditioning systems using the archives of observations of the nearest weather station. Practical recommendations have been developed for inclusion in the terms of reference for the development of design and estimate documentation for the modernization of air conditioning systems, for the purchase of central air conditioners for nuclear power plants.

Key words: central air conditioners, nuclear power plants, outside air.

Введение

В ближайшее время на Запорожской АЭС планируется замена центральных кондиционеров, обслуживающих помещения АЭС с системами (элементами), важными для безопасности.

Специалистам АЭС для разработки технических заданий на разработку ПСД модификаций систем кондиционирования воздуха, на закупку

центральных кондиционеров необходимо знать и уметь обосновывать:

- диапазон возможных параметров наружного воздуха на площадке АЭС;
- требования к системам управления центральными кондиционерами;
- требования к программам испытаний центральных кондиционеров на предприятии-

производителе.

В нормативных документах по проектированию систем кондиционирования воздуха:

- 5.13 [1];
- 13.2.8 [3]

указано, что для них следует принимать расчетные параметры наружного воздуха «Б» согласно [2].

Причем в нормативных документах в области строительной климатологии:

- в 10.1, 10.2 [2];
- в таблицах 1, 2, 6 [4] и на рисунке 6 [4] (климатические параметры Запорожской области в [2] не указаны).

Можно найти расчетные параметры наружного воздуха только в двух точках: для холодного и теплого периода года.

По современным представлениям (например, см. стр. 294 [5]), использование только двух расчетных точек не дает возможности правильно выбрать технологическую последовательность обработки воздуха, определить годовые энергетические показатели работы систем вентиляции и кондиционирования воздуха, разработать функциональную схему автоматического регулирования.

Обоснование границ области возможных параметров наружного воздуха

Согласно рекомендациям [6]; главы 7 [5];

1.5.2 [7]; главы 2 [8], назначаем расчетную область возможных параметров наружного воздуха, ограниченную:

- значениями температуры наружного воздуха для теплого периода года сверху и для холодного периода года – снизу;
- значениями удельной энтальпии наружного воздуха для теплого периода года сверху и для холодного периода года – снизу;
- минимальным значением относительной влажности воздуха;
- максимальным значением удельного влагосодержания воздуха в теплый период года. На основании рекомендаций, приведенных в таблице 1.4 [9], принимаем значения коэффициента обеспеченности параметров внутреннего воздуха $K_{об} = 0,995$ для систем кондиционирования воздуха атомных станций.

Расчетная область возможных параметров наружного воздуха для систем кондиционирования воздуха показана на рисунке Рис. 1 внутри многоугольника abcdefg.

Описание параметров наружного воздуха в характерных точках (по два значения из четырех) приведено в таблице 1.

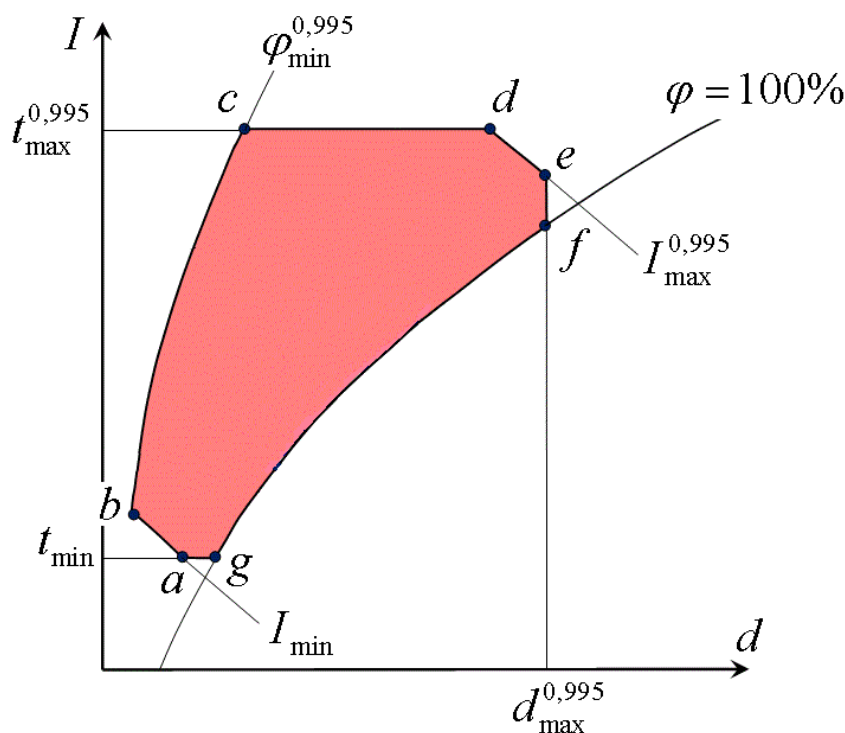


Рис. 1 Область возможных параметров наружного воздуха

Таблица 1

Точка	Расчетные значения параметров наружного воздуха			
	температура	относительная влажность	удельная энтальпия	удельное влагосодержание
a	минимальное значение за 2006-2020 годы	рассчитывается по двум параметрам (t и I)	значение во время наблюдения минимальной температуры воздуха за 2006-2020 годы	рассчитывается по двум параметрам (t и φ)
b	рассчитывается по двум параметрам (I и φ)	меньшее значение которой наблюдается 20 ч и менее в год (в среднем за 2006-2020 годы)	равна энтальпии в точке a	рассчитывается по двум параметрам (I и φ)
c	большее значение которой наблюдается 20 ч и менее в год (в среднем за 2006-2020 годы)	равна относительной влажности в точке b	рассчитывается по двум параметрам (t и φ)	рассчитывается по двум параметрам (t и φ)
d	равна температуре в точке c	рассчитывается по двум параметрам (t и I)	большее значение которой наблюдается 20 ч и менее в год (в среднем за 2006-2020 годы)	рассчитывается по двум параметрам (t и I)
e	рассчитывается по двум параметрам (I и d)	рассчитывается по двум параметрам (I и d)	равна энтальпии в точке d	большее значение которой наблюдается 20 ч и менее в год (в среднем за 2006-2020 годы)
f	рассчитывается по двум параметрам (d и φ)	100%	рассчитывается по двум параметрам (d и φ)	равно влагосодержанию в точке e
g	равна температуре в точке a	100%	рассчитывается по двум параметрам (t и φ)	рассчитывается по двум параметрам (t и φ)

Определение области возможных параметров наружного воздуха

Из архива наблюдений метеостанции, предоставленного сайтом <http://tr5.ua>, скопируем в рабочую книгу Microsoft Excel значения параметров наружного воздуха за 2006-2020 гг. в г. Николаеве (в нем находилась базовая метеостанция Запорожской АЭС):

- дату и время измерения;
- температуру;
- относительную влажность;
- атмосферное давление.

Для каждого измерения по формулам [9] стандартными функциями Microsoft Excel рассчитываем значения удельной энтальпии и удельного влагосодержания наружного воздуха. Задаемся произвольными значениями:

- минимальной относительной влажности воздуха $\varphi_{\min}^{0,995}$;
- максимального удельного влагосодержания $d_{\max}^{0,995}$;

- максимальной температуры воздуха $t_{\max}^{0,995}$;
- максимальной удельной энтальпии воздуха $I_{\max}^{0,995}$.

Методом подбора по критериям, приведенным в таблице 1, определяем расчетные значения параметров наружного воздуха с $K_{об} = 0,995$:

- минимальная относительная влажность воздуха $\varphi_{\min}^{0,995} = 20\%$;
- максимальное удельное влагосодержание $d_{\max}^{0,995} = 16,2$ г/кг;
- максимальная температура воздуха $t_{\max}^{0,995} = 35,3$ °C;
- максимальная удельная энтальпия воздуха $I_{\max}^{0,995} = 68,8$ кДж/кг.

Среднее атмосферное давление за период 2006-2020 гг. равно 101 кПа. Значения минимальной температуры воздуха за 2006-2020 гг. и соответствующей удельной энтальпии воздуха приведены в таблице 2.

Время в году за период 2006-2020 гг. с откло-

нениями от расчетных параметров наружного воздуха с $K_{об} = 0,995$ приведено в таблице 3.

Расчетные параметры воздуха в точках согласно рисунку Рис. 1 и таблице 1 для г. Никополя приведены в таблице 4. Область возможных

параметров наружного воздуха следует разбить на зоны, в каждой из которых производятся разные процессы обработки воздуха, указанная область для г. Никополя показана на рисунке 2.

Таблица 2

Год	Дата и время наблюдения	Значение параметров воздуха и единицы измерения	
		Минимальная температура в году, °С	Удельная энтальпия во время наблюдения, кДж/кг
2006	23.01.2006 8:00	-26,3	-25,8
2007	24.02.2007 8:00	-15,1	-13,3
2008	10.01.2008 8:00	-16,3	-14,3
2009	07.01.2009 2:00	-21,5	-20,4
2010	25.01.2010 8:00	-23,7	-23,0
2011	26.01.2011 23:00	-17,7	-16,1
2012	02.02.2012 08:00	-24,3	-23,7
2013	11.12.2013 8:00	-12,4	-10,0
2014	31.01.2014 8:00	-21,3	-20,7
2015	08.01.2015 08:00	-24,6	-24,0
2016	04.01.2016 08:00	-20,5	-19,4
2017	30.01.2017 05:00	-19,8	-18,7
2018	25.01.2018 5:00	-15,4	-13,3
2019	24.02.2019 5:00	-10,2	-6,7
2020	09.02.2020 8:00	-13,1	-10,7
За период 2006-2020 гг.		-26,3	-25,8

Таблица 3

Год	Время в году с отклонениями от расчетных параметров наружного воздуха с $K_{об} = 0,995$, ч			
	менее $\varphi_{min}^{0,995}$	более $d_{max}^{0,995}$	более $t_{max}^{0,995}$	более $I_{max}^{0,995}$
2006	0	24	0	30
2007	48	0	42	0
2008	18	12	12	0
2009	24	6	12	6
2010	9	75	63	78
2011	0	18	6	27
2012	18	6	27	0
2013	0	0	0	0
2014	12	3	12	9
2015	39	21	15	24
2016	15	9	54	15
2017	48	0	39	9
2018	36	21	0	18
2019	12	6	0	3
2020	15	75	18	69
В среднем:	20	18	20	19

Таблица 4

Точка	Значение параметров воздуха и единицы измерения			
	температура, °С	относительная влажность, %	удельная энтальпия, кДж/кг	удельное влагосодержание, г/кг
a	минус 26,3	75	минус 25,8	0,26
b	минус 25,9	20	минус 25,8	0,07
c	35,3	20	54,2	7,31
d	35,3	35	68,8	12,98

духа (точка R на рисунке 2), считая, что влагопоглощений в обслуживаемых помещениях нет:

- температуру $t_R = 25$ °C;
- относительную влажность $\varphi_R = 50$ %.

Принимаем минимальное значение удельного расхода наружного воздуха от номинального расхода воздуха кондиционера $z_{\min} = 0,2$.

По формулам [9] определяем значение удельной энтальпии воздуха h_P и h_R в точках P и R

R соответственно, значение удельного влагосодержания воздуха $d_P = d_R$ в точках P и R.

Определяем максимальную удельную энтальпию наружного воздуха, при которой необходим нагрев смеси наружного и рециркуляционного воздуха по формуле:

$$I_S = I_R - \frac{I_R - I_P}{z_{\min}}, \text{ кДж/кг} \quad (1)$$

Разбиваем область возможных параметров наружного воздуха на 5 зон, критерии для определения их границ и краткая характеристика процессов обработки воздуха в разных зонах

указаны в таблице 5, значения времени нахождения параметров наружного воздуха в каждой зоне указаны в таблице 6.

Таблица 5

Зона	Значение параметров воздуха		Процессы обработки воздуха	Удельный расход наружного воздуха
	удельная энтальпия	удельное влагосодержание		
1	$I < I_S$	$d < d_P$	нагрев и увлажнение	$z = z_{\min}$
2	$I_S \leq I < I_P$	$d < d_P$	увлажнение	$z = \frac{I_R - I_P}{I_R - I_i}$
3	$I \geq I_P$	$d < d_P$	охлаждение и увлажнение	$z = z_{\min}$
4	$I \geq I_R$	$d \geq d_P$	охлаждение и осушение	
5	$I < I_S$	$d \geq d_P$	не выполняются	$z = 1$

Примечание. I_i – текущее значение удельной энтальпии наружного воздуха.

Таблица 6

Год	Время нахождения параметров наружного воздуха в зонах									
	1		2		3		4		5	
	часов	в % от кол-ва в году	часов	в % от кол-ва в году	часов	в % от кол-ва в году	часов	в % от кол-ва в году	часов	в % от кол-ва в году
2006	1 368	15,62	5 346	61,03	744	8,49	1 284	14,66	18	0,21
2007	930	10,62	5 574	63,63	1 062	12,12	1 182	13,49	12	0,14
2008	1 440	16,39	5 334	60,72	864	9,84	1 110	12,64	36	0,41
2009	1 050	11,99	5 700	65,07	942	10,75	1 032	11,78	36	0,41
2010	1 308	14,93	4 917	56,13	633	7,23	1 881	21,47	21	0,24
2011	1 719	19,62	4 737	54,08	840	9,59	1 464	16,71	0	0,00
2012	1 605	18,27	4 377	49,83	1 170	13,32	1 599	18,20	33	0,38
2013	981	11,20	5 313	60,65	1 110	12,67	1 314	15,00	42	0,48
2014	1 212	13,84	5 295	60,45	1 083	12,36	1 161	13,25	9	0,10
2015	1 026	11,71	5 670	64,73	936	10,68	1 116	12,74	12	0,14
2016	1 515	17,25	5 100	58,06	732	8,33	1 413	16,09	24	0,27
2017	1 173	13,39	5 793	66,13	906	10,34	882	10,07	6	0,07
2018	1 486	16,96	4 979	56,84	1 020	11,64	1 272	14,52	3	0,03
2019	870	9,93	5 529	63,12	1 020	11,64	1 326	15,14	15	0,17
2020	936	10,66	5 625	64,04	930	10,59	1 287	14,65	6	0,07
Минимум	870	9,93	4 377	49,83	633	7,23	882	10,07	0	0,00
Максимум	1 719	19,62	5 793	66,13	1 170	13,32	1 881	21,47	42	0,48

В результате анализа данных получены значения количества переходов параметров наружного

воздуха из одной зоны в другую за время между измерениями, значения указаны в таблице 7.

Таблица 7

Год	Количество переходов между зонами				
	1-2 (2-1)	2-3 (3-2)	2-4 (4-2)	3-4 (4-3)	Всего
2006	62	65	31	64	222
2007	59	77	25	90	251
2008	46	72	24	100	242
2009	57	93	31	77	258
2010	65	67	27	100	259
2011	93	103	37	119	352
2012	59	108	53	190	410
2013	77	91	26	139	333
2014	69	111	35	133	348
2015	114	129	19	91	353
2016	104	93	29	113	339
2017	77	119	26	77	299
2018	89	115	39	113	356
2019	79	104	46	141	370
2020	74	117	76	131	398

Примечание к таблице 7.

Из рисунка 2 видно, что зона 2 не граничит с зоной 4. Если параметры наружного воздуха находились в зоне 2(4), а при следующем измерении – в зоне 4(2), это означает, что за время между измерениями параметры наружного воздуха

находились еще и в зоне 3.

В качестве примера рассмотрим параметры наружного воздуха в г. Никополе с 03:00 05.05.2012 до 09:00 06.05.2012, анализ этих параметров приведен в таблице 8.

Таблица 8

Час	Параметры наружного воздуха				Зона	Процессы обработки воздуха
	$t, ^\circ C$	$\varphi, \%$	$I, \text{кДж} / \text{кг}$	$d, \text{г} / \text{кг}$		
06.05.2012 09:00	21,5	59	9,5	45,8	3	охлаждение и увлажнение
06.05.2012 06:00	15,8	85	9,6	40,2	2	увлажнение
06.05.2012 03:00	18,0	78	10,1	43,8	4	охлаждение и осушение
06.05.2012 00:00	21,6	47	7,6	41,0	2	увлажнение
05.05.2012 21:00	23,5	48	8,7	45,9	3	охлаждение и увлажнение
05.05.2012 18:00	26,5	37	8,0	47,2	3	охлаждение и увлажнение
05.05.2012 15:00	26,2	37	7,9	46,5	3	охлаждение и увлажнение
05.05.2012 12:00	25,4	30	6,1	41,1	2	увлажнение
05.05.2012 09:00	20,2	57	8,5	41,8	3	охлаждение и увлажнение
05.05.2012 06:00	17,3	73	9,1	40,4	2	увлажнение
05.05.2012 03:00	19,0	79	11,0	46,9	4	охлаждение и осушение

Из таблицы 8 видно, что за 30 часов произошло 8 (точнее, 11 с учетом примечания к таблице 7) переходов параметров наружного воздуха из одной зоны в другую за время между измерениями.

Переключения режимов работы центрального кондиционера вручную выполнить невозможно.

Выводы

Анализ данных наблюдений базовой метеостанции Запорожской АЭС за 2006-2020 годы показал:

- системы кондиционирования воздуха с рециркуляцией от 49,83% до 66,13% времени в году могут поддерживать заданные параметры микроклимата в обслуживаемых помещениях без использования холодильных машин за счет изменения удельного расхода наружного воздуха (зона 2 на рисунке 2 и в таблице 6);
- из значений количества переходов параметров наружного воздуха из одной зоны в другую, указанных в таблице 7 и в примере по таблице 8, видно, что переключения режимов работы кондиционеров должна выполнять только их автоматика.

Из вышеуказанного можно сделать практические рекомендации по включению в технические задания на разработку ПСД модификации систем кондиционирования воздуха, на закупку центральных кондиционеров, предназначенных для обслуживания помещений АЭС:

- задать значения параметров воздуха на выходе из центральных кондиционеров и параметров рециркуляционного воздуха, которые должны обеспечиваться круглогодично;
- определить для площадки АЭС область возможных параметров наружного воздуха с разбивкой на зоны по аналогии с рисунком 2;
- предусмотреть в составе системы управления технические средства для измерения текущего значения температуры и относительной влажности наружного воздуха с последующим расчетом его удельной энтальпии;
- алгоритмы системы управления принять по аналогии с таблицей 5 (зону 5 разрешается объединить с зоной 4);
- предусмотреть возможность изменения объемного расхода наружного воздуха от заданного минимального значения до 100% системой управления по заданному алгоритму (при параметрах наружного воздуха в зоне 2, например, поддерживать заданную удельную энтальпию воздуха на выходе центрального кондиционера);
- в программе испытаний центральных кондиционеров на стенде предприятия-производителя предусмотреть создание параметров наружного воздуха не менее, чем в одной точке каждой зоны, по аналогии с ри-

сунком 2 (кроме зоны 5) и проверку автоматического изменения их режимов работы при переходах параметров наружного воздуха из одной зоны в другую по аналогии с таблицей 7.

Области возможных параметров наружного воздуха можно определить для любой географической точки мира, архивы наблюдений ближайших метеостанций находятся в открытом доступе.

Список литературы

- 1 СП 60.13330.2020 «СНиП 41-01-2003 Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха»
- 2 СП 131.13330.2018 «СНиП 23-01-99* Строительная климатология»
- 3 РД 210.006-90 «Нормы технологического проектирования атомных станций (с реакторами ВВЭР) (п. 5.3 СППНАЭ-87)»
- 4 СНиП 23-01-99 (2003) «Строительная климатология»
- 5 Белова Е.М. Центральные системы кондиционирования воздуха в зданиях. – М.: Евроклимат, 2006. – 640 с., ил. – (Библиотека климатехника)
- 6 РТМ 34-243-74 (РД 34.21.173) «Правила проектирования кондиционирования воздуха в щитах управления ТЭС»
- 7 Бондарь Е.С., Гордиенко А.С., Михайлов В.А., Нимич Г.В. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха. Под общ. ред. Бондаря Е.С. – К.: ТОВ «Видавничий будинок Аванпост-Прим», 2005. – 560 с., ил.
- 8 Рымкевич А.А., Халамайзер М.Б. Управление системами кондиционирования воздуха. М., «Машиностроение», 1977. – 274 с.
- 9 Кондиционирование воздуха и холодоснабжение: Учебник для вузов / В.Н. Богословский, О.Я. Кокорин, Л.В. Петров. Под ред. В.Н. Богословского. – М.: Стройиздат, 1985. – 367 с., ил.

References

- 1 SP 60.13330.2020 "SNiP 41-01-2003 Heating, ventilation and air conditioning"
- 2 SP 131.13330.2018 "SNiP 23-01-99* Structural climatology"
- 3 RD 210.006-90 "Norms of technological design of nuclear power plants (with VVER reactors) (clause 5.3 of the SPNAE-87)"
- 4 SNiP 23-01-99 (2003) "Construction climatology"
- 5 Belova E.M. Central air conditioning systems in buildings. – M.: Euroclimate, 2006. - 640 p., ill. – (Library of Climate Science)
- 6 RTM 34-243-74 (RD 34.21.173) "Rules for the design of air conditioning in TPP control panels"
- 7 Bondar E.S., Gordienko A.S., Mikhailov V.A., Nimich G.V. Automation of ventilation and air conditioning systems. Under the general ed . Bondary

E.S. – K.: TOV "Vidavnychy budinok Outpost-Ap-
prox.", 2005. – 560 p., il.

- 8 Rymkevich A.A., Halamizer M.B. Air conditioning
systems management. M., "Mechanical Engineer-
ing", 1977. – 274 p.

- 9 Air conditioning and refrigeration: Textbook for
universities / V.N. Bogoslovsky, About

УДК 621.436

Концептуальная оценка результатов исследований по оптимизации использования тепловой энергии в судовых дизелях, работающих по комбинированному циклу

В.П. Литвиненко

Азовский морской институт - Мариупольский филиал ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» в Донецкой Народной Республике, ул. Черноморская, д.19, Мариуполь, ДНР, 287500, VPLitvinenko@sevsu.ru

Статья поступила 16.05.2023 г. ; после доработки 17.05.2023 г.

Аннотация

Рассмотрены результаты теоретических исследований и эксперимента. Отмечено, что в цикле дизеля вероятно образование линии разрыва потока газов в такте расширения за счет затормаживания их движения насосным действием поршня. Приведены схемы экспериментальных установок и устройств. Введены новые показатели – объемная и линейная скорость газодинамических процессов, которые обеспечивают возможность осуществлять сравнительную оценку цикловых процессов в дизелях различного конструктивного исполнения. Обращено внимание на полезность использования методов определения разрыва потока газов в расчетах механизмов, конструкция которых предусматривает перемещение подвижной части по отношению к потоку газа.

Ключевые слова: Судовой дизель, цикл работы дизеля, объемная скорость, линейная скорость, поток газов, такт, разрыв потока газов, затормаживание потока газов, мощность дизеля, изобарный процесс, степень предварительного расширения.

Conceptual evaluation of the results of research on optimization of thermal energy conversion in marine diesel engines operating on a combined cycle

V.P. Litvinenko

Azov Maritime Institute - Mariupol branch of the Sevastopol State University in the Donetsk People's Republic, Chernomorskaya str., 19, Mariupol, DNR, 287500, VPLitvinenko@sevsu.ru

Received 16.05.2023 y; received in final form 17.05.2023 y..

Abstract

The results of theoretical studies and experiment are considered. It is noted that in the diesel cycle, the formation of a gas flow break line in the expansion stroke is likely due to the inhibition of their movement by the pumping action of the piston. Schemes of experimental installations and devices are given. New indicators have been introduced - the volumetric and linear velocity of gas-dynamic processes, which provide an opportunity to carry out a comparative assessment of cyclic processes in diesel engines of various designs. Attention is drawn to the usefulness of using methods for determining the gas flow break in the calculations of mechanisms, the design of which provides for the movement of the moving part in relation to the gas flow.

Key words: Marine diesel, diesel operation cycle, space velocity, linear velocity, gas flow, stroke, gas flow break, gas flow inhibition, diesel power, isobaric process, pre-expansion degree.

Введение

Основная идея работы состоит в том, что,

как это следует из результатов проработки вопроса, в основу проектирования и оценки эксплуатационных свойств судовых дизелей поло-

жены закономерности, характерные для классической термодинамики – термодинамической статики, методы которой не в полной мере учитывают динамику изменений потока газов во внутрицилиндровом пространстве двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и по этой причине не в состоянии

объективно отобразить наблюдаемые на практике процессы.

Например, сложно пояснить природу возникновения «помпажа», возникновение экономного режима работы дизеля, проявление изобарного процесса, обозначить оптимальные условия длительности цикла и ряд иных проблемных вопросов, что приводит к необходимости корректировки принимаемых решений на основании эмпирических наблюдений.

Проблемы несоответствия сложившейся теории проектирования и оценки эксплуатации судовых дизелей отмечались ведущими специалистами, такими как, например, Орлин А.С., Исаяев А.П., Миклос А.Г., Истомин П.А., Васильевич Ф.А., Вибе И.И. и многими другими исследователями, [1 – 4].

В то же время на несоответствие теоретических подходов, используемых в описании термодинамических процессов, указывалось в работах Пригожина, Конделупи, Кавтарадзе Р.З., Дьярамати И., Белоконь Н.И. и многих других ученых, [5 – 7]

По сути ведущие специалисты сводятся к мнению, что реализуемый до настоящего времени известный метод расчета Гриневецкого – Мазинга является безусловно полезным для пояснения внутрицилиндровых процессов, но обладает существенными недостатками. В первую очередь они относятся к теории описания внутрицилиндровых процессов.

Постановка задачи и цели исследования

Приняв во внимание наличие значительного количества статистического ряда значений, характеризующих работу судовых дизелей, в целях получения совокупной и сравнимой оценки протекания внутрицилиндровых процессов в каждой выделенной группе, нами выявлена потребность введения обобщающих параметров, позволяющих установить тренд развития динамики. Однако, в ходе выполненного обзора не было обнаружено такого показателя. Близкими по названию оказались показатели скорости сгорания, в виде массовой и линейной скоростей, которые были введены Семеновым Н.Н. еще в 1940 году

в работе «Тепловая теория горения и взрывов». Большей частью эти показатели относятся к оценке сгорания и не могут быть употреблены для целей исследования, [7,8].

В связи с таким положением, введено понятия объемной и линейной скорости процесса преобразования тепловой энергии сгорающих газов в работу, которые и употреблены для оценки дизеля. Такой подход основывался на том что все процессы в цилиндрическом пространстве относятся к объемным.

Для объемной скорости принята зависимость:

$$V_{об} = 0,0098 \frac{N_e}{P_e} (м^3/с) \quad (1)$$

Для линейной скорости принята зависимость:

$$V_l = \frac{M_{пр}}{S} = \frac{0,00984 N_e}{P_e \pi D^2} = 0,0125 \frac{N_e}{P_e D^2} (м/с) \quad (2)$$

где P_e – эффективное давление, бар; N_e – эффективная мощность цилиндра, кВт; S – площадь поршня, м; D – диаметр цилиндра, м.

В процессе исследования была установлена взаимосвязь изменения параметров двигателя в зависимости от изменения линейной и объемной скоростей сгорания:

$$V_l = \varphi(N_e; P_e; n; T; D; V_{об}) \quad (3)$$

$$V_{об} = \varphi(N_e; P_e; n; T; D; V_l) \quad (4)$$

где N_e – эффективная цилиндрическая мощность, кВт; P_e – эффективное давление, бар; n – число оборотов двигателя, об/мин; T – длительность сгорания, с; D – диаметр цилиндра, мм; $V_l, V_{об}$ – линейная и объемная скорости сгорания, соответственно м/с и м³/с.

Используемые в исследовании понятия объемной и линейной скоростей внутрицилиндровых процессов хорошо коррелируются с известными определениями массовой и нормальной скорости сгорания, однако, в отличие от них, позволяют производить сравнительную оценку ДВС по наблюдаемым на практике параметрам. В качестве демонстрации сродственности понятий отметим следующие соотношения:

$$V_H \cdot \rho_o \cdot \pi \cdot r^2 = V_m \cdot F = V_l \cdot \rho_o \cdot F; \quad V_H = \frac{\rho_x \cdot V_{об}}{\rho_o \cdot \pi \cdot r^2} \quad (5)$$

$$V_H \cdot \rho_o \cdot \pi r^2 = V_m \cdot F = V_l \cdot \rho_o \cdot F = \rho_x \cdot V_{об} \quad V_m \cdot F = \rho_x \cdot V_{об} \quad (6)$$

Использование вводимых параметров позволяет относительно простым расчетом определять количество тепла, выделяемого в цикле работы ДВС:

$$X = \frac{Q}{B_{см} \cdot H_{см}} = \frac{I}{B_{см}} \int_0^t \rho_x \cdot V_{об} \cdot dt \quad (7)$$

$$X = \frac{Q}{B_{cm} \cdot H_{cm}} = \frac{1}{B_{cm}} \int_0^t V_m \cdot F \cdot dt \quad (8)$$

В приведенных зависимостях: Q – количество тепла, поданного в цилиндр; B_{cm} – цикловая подача топлива; H_{cm} – теплотворная способность топливно-воздушной смеси; F – площадь сечения фронта пламени.

Нами отмечалось, что введенные параметры приводят к упрощению расчетов значимых показателей работы ДВС.

Таким образом, в работе ставилась задача проверки достоверности отображения параметров, характеризующих работу ДВС, использованием вводимых в исследование параметров линейной и объемной скорости процесса преобразования тепловой энергии сгорающих газов в механическую работу, в целях дальнейшего их использования для поиска и разработки методов оптимизации цикла работы судовых дизелей.

Анализ параметров работы судовых дизелей

С целью проверки выдвигаемой гипотезы, нами рассматривался статистический ряд наиболее характерных параметров работы дизельных двигателей. Всего было рассмотрено 150 модификаций, включая высокооборотные, среднеоборотные и малооборотные длинно ходовые дизели, [9].

Сделано допущение о том, что в изобарном процессе давление в цилиндре оказывается постоянным по причине равенства введенной объемной скорости - $v_{об}$ и скорости, с которой высвобождается объем цилиндра по мере перемещения поршня от ВМТ к НМТ, - $v_{ц}$.

$$v_{об} = v_{ц} \quad (9)$$

Скорость высвобождения объема цилиндра определялась по зависимости:

$$v_{ц} = 0,041 \cdot D^2 \cdot n \cdot (H \cdot \sin \alpha + 25 \frac{H^2}{L} \sin 2\alpha) \quad (10)$$

где D – диаметр цилиндра; n – число оборотов дизеля, H – ход поршня, α – угол поворота коленчатого вала.

Результаты расчетов равенства скоростей и степени предварительного расширения, как одного из основополагающих параметров, используемого в эксплуатации и при проектировании приведены в работе [9]. Отмеченный показатель для малооборотных дизелей находится в интервале 1,309 – 1,469, что соответствует значениям, используемым при проектировании и оценке эксплуатационных свойств действующих дизелей.

Анализ результатов расчетов позволил

прийти к выводу о том, что повышение мощности дизелей связано с изменением соотношения между линейной и объемной скоростями потока газов, причем, такое условие характерно для судовых длинно ходовых дизелей серии ME, RT-Flex, MC, C, LSC и RTA.

Вариативно, это соотношение находится в пределах: - для малооборотных ДВС от 1,12 до 4,5; - для среднеоборотных ДВС от 2,0 до 5,0; - для высокооборотных ДВС от 2,5 до 11,0. Фрагменты изменения объемной и линейной скорости потока газов в зависимости от мощности показаны на рис.1,2, а взаимосвязь между этими показателями отображена на рис.3.

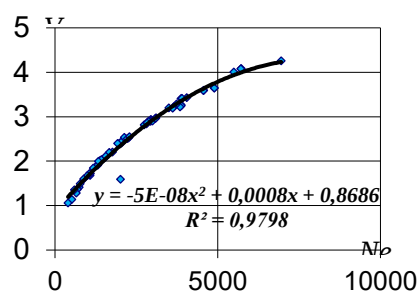


Рис. 1. Характер изменения линейной скорости потока газов, в зависимости от мощности

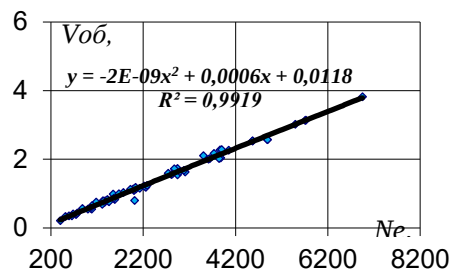


Рис. 2. Характер изменения линейной скорости потока газов, в зависимости от мощности

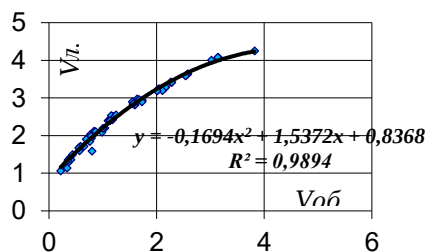


Рис.3. Особенности изменения линейной скорости потока газов в зависимости от изменения объемной скорости.

Анализ статистической обработки данных показал, что: 1. На всем протяжении повышения числа оборотов объемная скорость по темпу понижения превосходит темп понижения линейной

скорости, $\Delta v_l < v_{об}$; 2. По мере увеличения диаметра цилиндра ДВС объемная и линейной скорости приближаются по своему абсолютному значению, $\Delta v_l \cong v_{об}$; 3. По мере увеличения хода поршня темп приращения линейной скорости существенно превышает темп приращения объемной скорости, $\Delta v_l \gg v_{об}$; 4. По мере увеличения мощности ДВС отношения линейной скорости к объемной скорости по своим абсолютным значениям, $v_l/v_{об}$, близки к единице.

3.1. Использование объемных показателей с целью определения оптимальной длительности цикла.

Дальнейшее рассуждение об особенностях учета объемной скорости в оценке газодинамических процессов привели к мысли о том, что воздействие расширяющихся газов на поршень зависит от скорости его перемещения, которая обеспечивает высвобождение объема цилиндра за счет сил инерции, установившихся вследствие вращения коленчатого вала, а также проявления насосного действия поршня в цикле работы дизеля. В этой связи эффективность развития процесса образования мощности дизеля может быть выражена в виде некоторого импульса, такой результат характерен для процесса расширения, от момента завершения изобарного процесса. Значение этого параметра, вероятно, может быть отображено зависимостью: по мере, в фазе предварительного расширения, определяемого из соотношения:

$$N_x = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (v_{об} - v_{ц}) P_x d\alpha \quad (11)$$

где P_x – давление в цилиндре при текущем значении угла поворота коленчатого вала.

При такой постановке задачи исследования стало очевидным, что учет только скорости высвобождения объема цилиндра движущимся поршнем оказывается недостаточным. Механической составляющей в определении отмеченного импульса оказывается недостаточно, поскольку при движении поршня от ВМТ к НМТ в значительной степени начинает сказываться насосное действие поршня, которое нами не было отмечено при определении степени предварительного расширения по причине значительного превышения объемных процессов над линейными. Проявление насосного действия поршня поясняется тем, что передвижение поршня к НМТ органы газообмена закрыты, что и оказывается причиной его воздействия на термодинамику процесса.

При отмеченном подходе зависимость (11)

преобразуется к виду:

$$N_x = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} (v_{об} - \epsilon v_{ц}) P_x d\alpha \quad (12)$$

где ϵ – показатель, учитывающий насосное действие поршня.

При такой постановке задачи сделано допущение, что на некотором интервале хода поршня при его движении от ВМТ к НМТ возникает разрыв потока газов, что приводит к потере мощности. Таким образом, при условии, когда $v_{об} = \epsilon v_{ц}$, импульс силы и мощности стремится к 0, $N_x \rightarrow 0$.

В сущности, возникла потребность в решении задачи об оптимальном времени продолжения цикла или, как ее иногда называют, задачи снятия максимальной мощности с цикла. Рассмотрение отмеченных задач оказалась бы возможным при условии наблюдения разрыва потока газов в цилиндре в такте расширения, т.е. возникновения ударной волны расширения. Нами отмечалась противоречивость выводов ученых и специалистов в отношении разрыва потока газов при их расширении. В частности, в соответствии с теоремой Цемпелена существование ударных волн разряжения в дифференциальной модели отрицается. В то же время известно открытие, которым зарегистрировано существование ударных волн разряжения при условии использования соответствующих сред в некотором пространстве (заявка № ОТ-10012 от 30.01.1979).

Известна также работа «Ударные волны разряжения в численных решениях задач газовой динамики» Абакумова М.В., Мухина С.И. из ИМП им. Келдыша, в которой авторы приходят к заключению о том, что используемые в выводах о невозможности существования волн разряжения дискретные методы не обеспечивают корректного описания рассматриваемых процессов и по этой причине, применив разностные схемы дифференциальных математических моделей, ими делается вывод о существовании разрыва потока газов при выдвигании поршня из цилиндра. Причем, существование ударной волны сопровождается выделением так называемой «линией разрыва» потока газов, которая образуется вследствие перемещения потока в системе поршень-цилиндр, [10].

Принималась во внимание работа М.Г. Круглова, А.А. Меднова «Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания», изданная еще в 1988 году, в которой, используя инварианты Римана, авторы приходят к выводу о невозможном существовании волны разряжения в цикле работы дизеля, [11]. Основ-

ным аргументом, который ими используется, является невозможность перемещения поршня равной или более скорости звука во внутрицилиндровом процессе. Это следует из зависимости:

$$a = \frac{\gamma-1}{2} \left(\frac{2}{\gamma-1} a_n - |u_n| \right) \quad (13)$$

где a – скорость звука за линией разрыва, м/с; a_n – скорость звука до образования линии разрыва, м/с; u_n – скорость поршня в текущем интервале времени; γ – показатель адиабаты.

Отмечалось, что в выражении (13) не принималась во внимание особенность протекания процесса расширения газов, которое происходит при условии, когда органы газообмена оказываются закрытыми и движение поршня от ВМТ к НМТ приводит к проявлению насосного действия поршня и, как следствие, к затормаживанию потока газов, образующих движущий поршень силы. Так что, принимая во внимание, что газы получают кинетическую энергию от воздействия температуры и, в этот же момент затормаживаются в своем движении насосным действием поршня. Такое затормаживание потока приводит к его одновременному охлаждению, что, собственно, и способствует образованию движущей силы, о которой писал Карно. Скорость затормаживания движущихся молекул газа будет, вероятно, не ниже скорости звука при соответствующей температуре.

Таким образом, нами было сделано допущение о необходимости преобразования приведенной зависимости (13) из условия: 1. Обозначенная скорость звука за линией разрыва – ***а принимается нами как скорость непосредственно на линии разрыва***; 2. Скорость звука до образования линии разрыва – ***а_н принимается как скорость в высвобождаемом поршнем объеме***; 3. Скорость движения поршня отвергается, принимается во внимание скорость газов, с которой они «откачиваются» – затормаживаются движущимся от ВМТ к НМТ поршнем. ***Эта скорость зависит от температуры газов и линейной скорости движения поршня – а_п.***

Делалось допущение о том, что с повышением темпа охлаждения газов в обозначенном режиме повышается эффект от используемого в цикле тепла.

При таком подходе, зависимость (13) примет вид:

$$a = \frac{\gamma-1}{2} \left(\frac{2}{\gamma-1} a_n - a_n \right) \quad (14)$$

Преобразованная зависимость дала основание предположить существование линии разрыва в цикле работы дизеля и, в особенности,

длинно ходового дизеля, работающего по комбинированному циклу, поскольку как нами было отмечено линейная и объемная скорости при увеличении мощности приближаются по своим абсолютным значениям. Это допущение потребовало дополнительной проверки, проведением эксперимента.

Учитывая сложность проведения такого эксперимента на реальном ДВС и противоречивостью взглядов в отношении возникновения отмечаемой линии разрыва потока газов в ходе их расширения, постановка эксперимента проводилась в два этапа.

3.2. Результаты эксперимента по установлению линии разрыва потока газов на механическом устройстве.

С целью проверки выдвигаемой гипотезы о вероятном возникновении отмечаемой линии разрыва, в условиях лаборатории СДВС кафедры судовых энергетических установок института изготовлена экспериментальная установка. Конструктивно установка содержит стеклянный цилиндр, полость которого ограничена крышками. При этом одна из крышек обеспечивает герметичное уплотнение в плоскости контакта с цилиндром через посредство уплотнительной прокладки и одновременно служит местом для установки штуцерного соединения с воздушным насосом, с помощью которого создавалось избыточное давление. Другая крышка, будучи соединенной шпильками с уплотняющей крышкой, не является герметичной по отношению к цилиндру, а используется в качестве упора для пружины сжатия и как направляющая штока поршня за счет выполненного по диаметру оси штока отверстия.

В полости цилиндра размещен плотно прилегающий к поверхности цилиндра поршень, связанный со штоком. Длина штока рассчитывалась таким образом, чтобы достигалась возможность надежного соединения с пружиной в ее свободном состоянии.

Поршень выполнен из фторопласта с установкой резиновых уплотнительных колец. В теле поршня, в осевом направлении, выполнено сквозное отверстие по диаметру невозвратного клапана, который через посредство соединительной трубки связан с вакуумметром стрелочного типа.

В целях сжатия пружины в конструкции предусмотрено использование винта и гайки с ленточной резьбой. Удержание пружины в сжатом состоянии предусмотрено использованием двуплечего рычага, в короткой части которого

выполнены вырезы для их размещения в фиксаторах.

Геометрические размеры цилиндра и жесткость пружины избирались из условия вероятной имитации процесса расширения газов в дизеле. Жесткость пружины избиралась из условия обеспечения скорости перемещения поршня в свободном состоянии в интервале значений, характерных для малооборотных дизелей, (6 – 8) м/с.

В этой связи, в ходе выполнения эксперимента скорость перемещения конца пружины при ее выпрямлении рассчитывалась по методикам, которые предусмотрены для расчета изготавливаемой в промышленности пружины. Расчетная схема установки показана на рисунке 4, а ход эксперимента отображен на фотографиях 1,2.

Порядок проведения эксперимента включал в себя: 1. Сжатие пружины до предела соприкосновения витков; 2. Фиксация пружины в сжатом состоянии; 3. Подача избыточного давления в пространство над поршнем, в интервале (2,5-3,0) бара; 4. Снятие фиксирующего рычага; 5. Наблюдение за процессом и контроль изменения давления в цилиндре в начале эксперимента и в период движения поршня.

При проведении эксперимента осуществлялась видеосъемка камерой с частотой 50 кадров в секунду, что обеспечило возможность в определенной мере судить о скорости протекания процесса использованием соответствующих компьютерных программ.

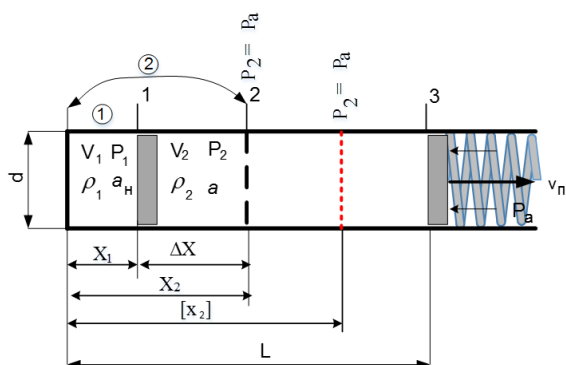


Рис.4. Расчетная схема экспериментальной установки: $d = 56$ мм – диаметр цилиндра; V_1, V_2 – объем первой и второй полости цилиндра; ρ_1, ρ_2 – плотность воздуха в первой и второй области; P_1, P_2 – давление воздуха в первой и второй области; a_n, a – скорость звука в первой и второй области; V_n – скорость и направление перемещения поршня; P_a – атмосферное давление; $X_1 = 86$ мм – протяженность первой области, области сжатого воздуха; $\Delta X = 40$ мм – ход поршня до линии разрыва; $L = 260$ мм – протяженность рабочей области цилиндра; 1, 2, 3 – условные сечения цилиндра.



Фото 1. Положение поршня в начале эксперимента.

В области перед поршнем избыточное давление 3 бара, пружина сжата.



Фото 2. Положение поршня в момент высвобождения пружины. В области перед поршнем наблюдаются изменение цвета воздушной среды.



Фото 3. Положение поршня в момент высвобождения пружины. В области перед поршнем наблюдаются изменение цвета воздушной среды.

Установлено, что по условию равенства давления в цилиндре $P_2 = P_a$ линия разрыва потока газов находится на расстоянии $X_2 = X_1 + \Delta x = 86 + 40 = 126$ мм. В тоже время, для случая, когда движение поршня осуществляется без воздействия пружины, условие $P_2 = P_a$ выполняется при прохождении поршнем расстояния $[X_2] = 184,14$ мм. Это следует из соотношения $[X_2] = X_2 \sqrt{P_1/P_2}$. Разница в полученных значениях составила $[X_2] - X_2 = 184,14 - 126 = 58,14$ мм. Причиной такого результата является насосное действие поршня, вызванное его перемещением.

Поршень, перемещаясь в цилиндре, создает эффект торможения для перемещающегося потока газа, выступая в роли поршневого насоса, откачивающего газы, наряду с тем, что он перемещается под воздействием избыточного давления. Причем, отмечаемое условие образования линии разрыва вызвано не столько скоростью поршня, сколько созданием условий затормаживания движения потока газов как некоторой сплошной деформируемой среды, приводящей к изменению внутренней энергии. Скорости потока газов сопоставимы со скоростью звука. Полученный результат подвергался проверке использованием соотношения:

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^\gamma = \left(\frac{a_n}{a_n}\right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \quad (15)$$

из которого следует, что скорость, с которой затормаживается поток газа, будет равна:

$$a_n = a_n \sqrt{\frac{2\gamma}{\gamma-1} \frac{P_2}{P_1}} \quad (16)$$

Скорость звука в изобарном процессе, до линии разрыва, из условия $\gamma = 1$ определялась по соотношению:

$$a_n = \sqrt{\gamma \frac{P_1}{\rho_1}} = \sqrt{\gamma RT} \quad (17)$$

где ρ_1 – плотность газов в изобарном процессе, до линии разрыва; R – универсальная газовая постоянная; T – температура газов в рассматриваемом процессе.

Плотность газов, находящихся в цилиндре, из условия, что в настоящей работе используется воздух, определялась из соотношения:

$$\rho_1 = \frac{P_1 M}{RT}, \quad (18)$$

где M – молярная масса воздуха, принята $29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Расчетом определены значения обозначенных скоростей, которые составили: $a_n = 289,93$ м/с, $a_n = 247,78$ м/с и скорость на линии разрыва – $a = 240,37$ м/с.

На основании полученных результатов, с определенной долей достоверности можно допустить вероятность возникновения линии разрыва потока газов в термодинамических системах, в конструкции которых используются подвижные части, взаимодействующие с потоком газов. Такие системы нами обозначились как термомеханические системы, к которым мы относим, в том числе, и длинно ходовые дизельные двигатели.

В этой связи сделаны определенные допущения в части наблюдаемого процесса в виде характеристики изменения давления, показанной на рисунке 5.

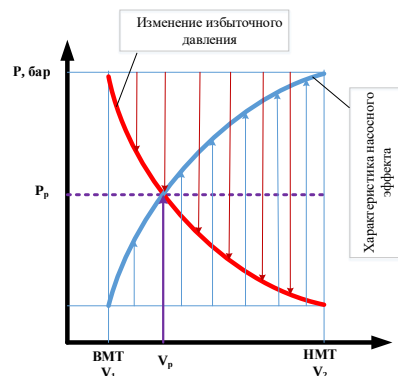


Рис. 5. Характеристика изменения давления в цилиндре при образовании линии разрыва потока газов

3.3. Результаты эксперимента по установлению линии разрыва потока газов на четырехтактном дизеле.

Дальнейшие исследования по проверке выдвинутой гипотезы проводились на четырехтактном одноцилиндровом дизеле типа 1Ч, фото 4. Схема эксперимента показана на рисунке 6.

Максимальное число оборотов дизеля 1500 об/мин, ход поршня – 101 мм, диаметр цилиндра – 84 мм. В заведомо рассчитанном месте, в цилиндре выполнено сверление, предназначенное для резьбового соединения (4) полости цилиндра с трубопроводом и распределительным клапаном (3), управляемым датчиком Холла (5) и связанным с манометрическим вакуумметром (2).

Учитывая, что дизель работает по четырехтактному циклу, установка датчика (5) осуществлялась на шестерне распределительного вала так, чтобы достигалась наиболее благоприятная возможность подачи управляющего сигнала на распределительный клапан (3) именно в такте расширения.

Принцип работы приведенной схемы состоит в том, что датчик (5), установленный на шестерне распределительного вала дизеля (1), считывает информацию о положении поршня в цилиндре, выраженную в угле поворота вала.



Фото 4. Четырехтактный дизель 1Ч, используемый в эксперименте.

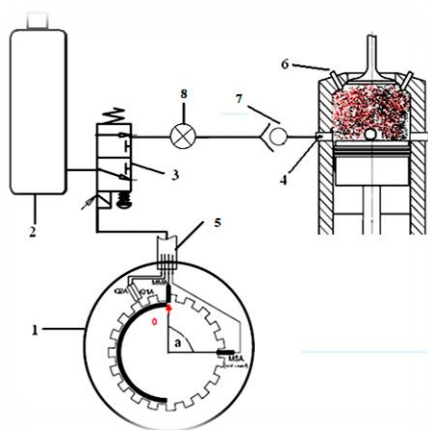


Рис. 6. Принципиальная схема снятия параметра и подачи заряда воздуха в цилиндр: 1 – шестерня распределительного вала; 2 – баллон сжатого воздуха; 3 – распределительный клапан; 4 – резьбовое соединение с трубопроводом; 5 – датчик Холла; 6 – форсунка дизеля; 7 – невозвратный клапан; 8 – манометрический вакуумметр.

Это положение соответствует максимальной скорости поршня. Информация о положении поршня передается к распределительному клапану (3), который, будучи связанным с манометром (2) пропускает газы в полость манометра (2) в момент движения поршня от верхней мертвой точки к нижней мертвой точке.

Контроль параметра осуществлялся на работающем дизеле без нагрузки на различных оборотах. При этом была установлена четкая тенденция резкого понижения давления в обозначенной точке. Вариативно это давление находилось в интервале от 0,8 бар до 5,0 бар, повышаясь с увеличением числа оборотов коленчатого вала.

Таким образом, ставилась задача повышения эффективности смешанного цикла за счет, с одной стороны, исключения условий разрыва потока газов и, с другой стороны, за счет подачи свежего заряда воздуха, позволяющего вовлечь температуру потока газов в процесс преобразования тепловой энергии в механическую работу.

Сжатый воздух, находящийся в баллоне (2) под давлением (3–5) бар, через посредство распределительного клапана (3), управляемого датчиков Холла (5), подавался в цилиндр дизеля через невозвратный клапан (7) и сверление (4) в момент, когда поршень дизеля проходил отмеченное отверстие (4) в такте расширения.

Эксперимент проводился на различных режимах работы дизеля, от минимально возможных до максимальных оборотов, без нагрузки. В результате было установлено некоторое снижение расхода топлива. Причем, в режиме средних оборотов такое снижение находилось в пределах

6% от номинального значения, которое устанавливалось на работающем дизеле при отсутствии обозначенных устройств модернизации.

Замечено также существенное понижение температуры выхлопных газов, что указывало на вероятность снижения количества выбросов в атмосферу, в особенности выбросов оксида азота, поскольку его образование характерно при температурах 1000°K , свойственной работе современных дизелей.

В ходе исследования учитывались ограничения по снятию параметров работы дизеля, так же, как и собственно чистота эксперимента, вызванные недостатком технологического оборудования и средств измерения, которые были бы нормированы и конструктивно отвечали сложившимся требованиям.

Выводы

1. Использование показателей объемной и линейной скорости в оценке протекания термодинамических процессов оказывается полезным для решения многих теоретических задач. Например, конкретизацию критериев подобия Струхаля, Фрудта, Эйлера и других теоретических показателей, которые могут быть использованы для анализа работы дизеля.

2. Результаты эксперимента свидетельствуют о возникновении ударных волн разрежения в термомеханических системах, к которым нами отнесены ДВС. На это обстоятельство указывает понижение давления в цилиндре до момента полного выпрямления пружины, используемой для перемещения поршня. Это же обстоятельство подтверждается расчетом скорости потока газов на линии разрыва, которая равна, $a = 240,37$ м/с, при скорости затормаживания потока газов движущимся поршнем равной $a_n = 247,78$ м/с. При полученных значениях наблюдается превышение скорости затормаживания потока над его скоростью на линии разрыва, $a_n > a$, что указывает на понижение давления в цилиндре меньше, чем атмосферное давление.

3. Учитывая полученные результаты эксперимента, можно допустить вероятность возникновения линии разрыва в цикле работы малооборотных длинно ходовых ДВС, поскольку, как это следует из анализа статистических данных, соотношение между линейной и объемной скоростями по абсолютному значению равно $v_n/v_{об} = 1,14$, что указывает на существенное затормаживание потока газов поршнем, движущимся от ВМТ к НМТ.

4. Возникновение линии разрыва, а по сути

– ударной волны разряжения в такте расширения, обозначает длительность эффективно протекающего процесса и позволяет установить оптимальную фазу выпуска отработавших газов в зависимости от протяженности хода поршня или, что тоже, углу поворота коленчатого вала. Визуально процесс протекания цикла в таком дизеле показан на теоретической диаграмме (Рис. 7).

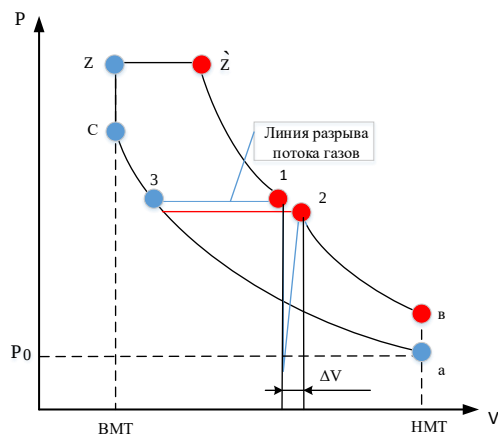


Рис. 7. Теоретическая индикаторная диаграмма смешанного цикла дизеля: 1. Равновесное состояние в изобарном процессе $Z - Z'$, поскольку $(-V_p) = (+V_r)$; 2. Неравновесное состояние – в политропическом процессе $Z - 1$, поскольку $(-V_p) > (+V_r)$; 3. Равновесное состояние – в момент равенства скорости потока газов, движущихся под воздействием давления и затормаживания этого же потока газов за счет проявления насосного действия поршня, участок 1 – 2; 4. Неравновесное состояние – наблюдается на линии расширения до момента открытия выпускных органов, участок 2 – в.

5. Использование принятых к исследованию показателей объемной и линейной скорости позволяет получить некоторую относительную теоретическую оптимальную индикаторную диаграмму цикла дизеля, что даст возможность производить оценку эффективности действующих ДВС, работающих по смешанному или комбинированному циклу.

6. В практическом отношении. Принятые допущения дают возможность предположить вероятность снижения шумности дизелей, поскольку, как это можно допустить из результатов расчета условий образования линии разрыва потока газов, именно ее прохождением потоком газов, т.е. возникновением ударной волны, является основной причиной избыточного шума в работе ДВС.

7. В конструкции длинно ходовых дизелей

обеспечивается возможность увеличения проходных сечений продувочных окон, используемых для подачи надувочного воздуха и как, следствие повышения эффективности их работы.

8. Повышение достоверности результатов исследования. Для подтверждения результатов исследования потребуется использование одноцилиндрового двухтактного дизеля с воздушным охлаждением, по причине упрощения экспериментов и как следствие повышение их достоверности.

Список литературы

1. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / [Вырубов Д. Н., Иващенко Н. А., Ивин В. И. и др.]; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
2. Кавтарадзе Р. З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы: Учебное пособие для вузов / Кавтарадзе Р. З. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. – 720 с.
3. Вибе И. И. Новое о рабочем цикле двигателей. (Скорость сгорания и рабочий цикл двигателя) / Вибе И. И. – Государственное научно-техническое издательство машиностроительной литературы. – Москва, 1962. – 271 с.
4. Теория двигателей внутреннего сгорания. Под. Ред. проф. д-ра техн. наук. Н. Х. Дьяченко. – Л., «Машиностроение», 1974. – 552 с.
5. Пригожин И. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур / Пригожин И., Канделупи Д.; [пер. с англ. Ю. А. Данилова и В. В. Белого]. – М.: Мир, 2002. – 461 с.
6. Пригожин И. Введение в термодинамику необратимых процессов / Пригожин И. – Ижевск. НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 160 с.
7. Семенов Н. Н. Тепловая теория горения и взрывов. Успехи физических наук. Т. XXIV, вып. 4. – 1940 – С. 433-486.
8. Соколик А. С. Процессы нормального сгорания в двигателях / А. С. Соколик // Сгорание в транспортных поршневых двигателях. – АН СССР. – 1951. – С. 24 – 26.
9. Литвиненко В.П. Неравновесность термомеханических процессов в цикле судовых дизелей: монография / В.П. Литвиненко. – Одесса: Феникс, 2017. – 176с.
10. Ударные волны разряжения в численных решениях задач газовой динамики / Абакумов М.В., Мухин С.И., Попов Ю.П., Рогожин Д.В. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2008. – 32 с.
11. Круглов М.Г. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания / М.Г. Круглов, А.А. Меднов. – М.: Машиностроение,

1988. – 360с.

References

1. Internal combustion engines. Theory of piston and combined engines / [Vyrubov D. N., Ivashchenko N. A., Ivin V. I. et al.]; ed. A. S. Orlin, M. G. Kruglov. - M.: Mashinostroenie, 1983. - 372 p.
2. Kavtaradze R. Z. Theory of piston engines. Special chapters: Textbook for universities / Kavtaradze R. Z - M.: Publishing house of MSTU im. N. E. Bauman, 2008. - 720 p.
3. Vibe I.I. New about the working cycle of engines. (Combustion rate and engine duty cycle) / Vibe I - State scientific and technical publishing house of machine-building literature. - Moscow, 1962. – 271 p.
4. Theory of internal combustion engines. Under. Ed. prof. Dr. tech. Sciences. N. Kh. Dyachenko. - L., "Engineering", 1974. - 552 p.
5. Prigogine I. Introduction to the thermodynamics of irreversible processes / Prigozhin I - Izhevsk. Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001. - 160 p.
6. Prigogine I. Modern thermodynamics. From heat engines to dissipative structures / Prigozhin I., Kandepudi D.; [perr. from English. Yu. A. Danilov and V. V. Bely]. – M.: Mir, 2002. – 461 p.
7. Semenov N. N. Thermal theory of combustion and explosions. Advances in the physical sciences. T. XXIV, no. 4. - 1940 - C. 433-486.
8. Sokolik A.S. Processes of normal combustion in engines / A.S. Sokolik // Combustion in transport piston engines. - Academy of Sciences of the USSR. - 1951. - S. 24 - 26.
9. Litvinenko V.P. Non-equilibrium of thermomechanical processes in the cycle of marine diesel engines: monograph / V.P. Litvinenko. - Odessa: Phoenix, 2017. - 176 p.
10. Shock waves of rarefaction in numerical solutions of problems of gas dynamics / Abakumov M.V., Mukhin S.I., Popov Yu.P., Rogozhin D.V. – M.: IPM im. M.V. Keldysh RAN, 2008. - 32 p.
11. Kruglov M.G. Gas dynamics of combined internal combustion engines / M.G. Kruglov, A.A. Mednov. - M.: Mashinostroenie, 1988. - 360s.

УДК 621.039.5

Жидкосолевой реактор

К.В. Муреева¹, В.М. Коляденкова²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33

г. Севастополь, 299053, Россия,

¹ksesha_31169@mail.ru, ²barrdragon@gmail.com

Статья поступила 04.04.2023 г.; после доработки 15.04.2023г.

Аннотация

Рассмотрена конструкция и материалы в составе жидкосолевого реактора. Выполнен анализ систем безопасности относительно принятой гомогенной конструкции активной зоны. Рассмотрена область применения жидкосолевого реактора в решении проблем ядерной энергетики. Рассмотрен жидкосолевой реактор как решение проблемы утилизации радиоактивных веществ.

Ключевые слова: жидкосолевой реактор, отработанное ядерное топливо, развитию ядерной энергетики, минорные актиниды.

Molten salt reactor

K.V. Mureeva¹, V.M. Koliadenkova²¹Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,¹ksesha_31169@mail.ru, ²barrdragon@gmail.com

Received 04.04.2023 y. ; received in final form 15.04.2023 y.

Abstract

The design and materials in the composition of a molten salt reactor are considered. The analysis of safety systems with respect to the adopted homogeneous design of the core is carried out. The scope of application of the molten salt reactor in solving problems of nuclear power is considered. The molten salt reactor is considered as a solution to the problem of disposal of radioactive substances.

Keywords: molten salt reactor, spent nuclear fuel, development of nuclear power, minor actinides.

Введение

С развитием ядерной энергетики возникает вопрос ограниченных ресурсов урана и перехода на замкнутый топливный цикл. Также остро стоит проблема необходимости переработки отработавшего ядерного топлива с рециклированием делящихся материалов, сжиганием наиболее опасных его компонентов.

Для решения данной проблемы могут быть задействованы жидкосолевые реакторы (ЖСР), позволяющие утилизировать образующиеся при переработке отработавшего ядерного топлива

минорные актиниды.

Цель и постановка задачи

Целью данной работы является анализ областей применения жидкосолевых реакторов для решения глобальных проблем в ядерной энергетике.

Общие сведения

Для утилизации минорных актинидов была предложена концепция сжигания радиоактивных отходов в составе активной зоны на базе

жидкосолевого реактора, который предполагается построить на базе Горно-химического комбината (ГХК). Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала (НИКИЭТ) определен главным конструктором жидкосолевого исследовательской реакторной установки.

Жидкосолевой реактор, или реактор на расплавах солей — это установка, в которой активную зону формирует гомогенная расплавленная смесь из фторидов солей и фторида делящегося материала (урана, плутония или тория). Топливная композиция одновременно служит теплоносителем первого контура. ЖСР гипотетически имеет ряд преимуществ перед современными твердотопливными реакторами.

Во-первых, он обладает свойством «естественной безопасности»: температурный и пустотный коэффициенты в нем отрицательны, что исключает тяжелые аварии типа чернобыльской. Температура в активной зоне очень высокая — порядка 700 °С, но давление в контуре отсутствует, что повышает безопасность реактора.

Во-вторых, для реактора на расплаве солей не надо изготавливать тепловыделяющие элементы и топливные сборки, и перерабатывать их тоже не придется. В-третьих, в ЖСР отлично «горит» одна из главных проблем атомной энергетики — минорные актиниды. Это долгоживущие радиоактивные вещества, возникающие при облучении ядерного топлива.

Не предполагается, что исследовательский реактор будет использоваться для выработки электроэнергии, но из-за работы в тесном контакте с горно-химическим комбинатом не исключается возможность того, что в процессе разработки будет решено обеспечить генерацию 2–3 МВт энергии для компенсации затрат на собственные нужды, а также на возможные нужды ГХК. В таком случае в установку добавят турбину, хотя это и повысит стоимость сооружения. Если после исследовательского реактора будет запущен промышленный, то ожидается, что на нем будет турбина мощностью около 1000 МВт. Пар для снабжения турбины будет генерироваться в парогенераторе, тепло в который будет поступать от теплоносителя промежуточного контура. При этом первый и промежуточный контуры и теплообменник промежуточного контура-парогенератора расположены непосредственно в ЖСР.

Используемое топливо

Топливо для реактора на расплавах солей

разрабатывается в Высотехнологическом научно-исследовательском институте неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара (ВНИИНМ). Этим топливом будет тетрафторид плутония из переработанного топлива реакторов ВВЭР, растворенный в смеси фторидов лития и бериллия (соль FLiBe). В смесь также будут добавлять фториды минорных актинидов для их выжигания. В качестве композиции была выбрана FLiBe, так как эта соль менее активна для используемых материалов. Но FLiNaK остается в проекте как запасной вариант, потому что работы по созданию новых конструкционных материалов не прекращаются. В процессе развития работ по проекту возможен переход на эту композицию.[3]

В процессе переработки топлива будут образовываться в основном относительно короткоживущие РАО: цезий, стронций, цирконий, молибден. Период полураспада этих радионуклидов — 30–50 лет. То есть через 500 лет остаточная радиоактивность таких РАО станет ничтожной. Это разумный срок для контролируемого приповерхностного хранения, оно обойдется гораздо дешевле и будет безопаснее, чем глубинное захоронение минорных актинидов. Таким образом использование жидкосолевых реакторов помогает решить одну из глобальных проблем ядерной энергетики — хранение отработавшего ядерного топлива.

Достоинства данного типа реактора

За счет своей конструкции и используемого топлива, жидкосолевые реакторы обладают множеством достоинств:

- высокоэффективный баланс нейтронов. В реакторах с жидким или газообразным топливом легко организовать непрерывную циркуляцию горючего через байпасный контур, в котором теми или иными методами топливо будет освобождено от продуктов деления. Это первая причина хорошего баланса нейтронов. Также, из-за значительно меньшего по сравнению с другими типами реакторов количества конструкционных материалов в активной зоне, в ЖРС уменьшен паразитарный захват нейтронов. Количественным показателем эффективности нейтронного баланса служит коэффициент конверсии топлива, который в тепловых ЖСР достигает значений 0,8—0,9 для уран-плутониевого топливного цикла, а для уран-ториевого цикла может быть даже реализовано расширенное воспроизводство топлива

с коэффициентом воспроизводства 1,06—1,10;

- большая глубина выгорания горючего. В реакторах с жидкими топливными элементами в принципе нет проблемы изменения механических свойств ТВЭЛ под действием излучения, а изменение теплофизических свойств топлива незначительно. Если при этом принять во внимание, что организация непрерывного удаления основных продуктов деления обеспечивает коэффициент конверсии топлива близкий к единице, то можно утверждать, что глубина выгорания в этих реакторах практически неограниченна;
- возможность гибкой работы реактора в режиме переменных нагрузок. В твердотопливных реакторах периодическое регулирование мощности приводит к значительным термоциклическим нагрузкам в ТВЭЛх, что снижает ресурс их работы, а также к ксеноновому отравлению реактора. Реакторы с жидкотопливными элементами по своей сути лишены обоих этих недостатков. Понятие термонапряжений в жидкости просто лишено смысла, а ксенон в силу малой растворимости в жидком топливе может быть легко выведен из активной зоны;
- возможность трансмутации минорных актинов. В ЖСР, за счет использования жидкого топлива, нет необходимости в изготовлении топливных элементов, содержащих актиниды. Более того, в системах ЖСР применяются технологии непрерывной переработки топливной композиции с возможностью добавления нуклидов в топливо и выведения их из него, что приводит к потреблению минорных актинов с высокой степенью выгорания и минимальной обработкой [4].

Недостатки данного типа реактора

К сожалению, несмотря на все достоинства применения жидкосолевых реакторов, необходимо сказать о его недостатках:

- более высокая коррозия материалов активной зоны от расплава солей;
- низкий коэффициент воспроизводства по сравнению с жидкометаллическими реакторами с натриевым теплоносителем;
- концепция жидкосолевого устройства не достаточно прописана в существующей нормативной базе, что потребует проведения дорогостоящих научно-исследовательских

и опытно-конструкторских работ для обоснования безопасности;

- необходимы дополнительные исследования в области создания материалов с высокими прочностными и коррозионными характеристиками;
- некоторые из этих недостатков лишь временные и могут быть преодолены при дальнейшем развитии ядерной энергетики в области жидкосолевых реакторов, разработке новых конструктивных материалов.

Безопасность данного типа реактора

Основа безопасности жидкосолевого реактора – это отрицательные температурный и пустотный коэффициент реактивности. Благодаря этому реактор обладает свойством саморегулирования. Система управления реактором будет выполнена в полном соответствии с современными нормативными требованиями. Предполагается, что реактор будет построен в подгорной части комбината, на месте бывшего машинного зала подземной АТЭЦ. Это место достаточно изолировано от внешней среды. Также, возможно, реакторная установка будет размещена в герметичной капсуле, что обеспечит еще один барьер безопасности.

Также предполагается увеличение радиационной безопасности за счет моноблочной структуры ЖСР. Высокорадиоактивное топливо не выносится за пределы активной зоны, а циркулирующий через активную зону расплав солей фторидов промежуточного контура практически не активируется, поэтому даже при его утечке не происходит никакого радиационного загрязнения окружающей среды. Обеспечивается дополнительная безопасность за счет исключения замерзания трубопроводов промежуточного контура при работе реактора благодаря составу солей фторидов промежуточного контура, находящемуся всегда в жидком состоянии при наличии в активной зоне расплава солей фторидов топлива [5].

Сроки реализации проекта

Технический проект установки планируется закончить в 2024 году, к этому времени должны быть определены количество оборудования и стоимость сооружения. Из этого следует, что существенную часть обосновывающих научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ должны выполнить до 2024 года. Также в этом году ГХК должен получить лицензию на

размещение. В 2027 году планируется получение лицензии на строительство, а в 2031 году – пуск исследовательского жидкосолевого реактора на горно-химическом комбинате.

Заключение

Подводя итог вышеизложенному, можно сказать что жидкосольевой реактор – это успешное решение проблемы переработки ядерного топлива. Жидкосольевой реактор позволяет сжигать минорные актиниды, что является весомой причиной для разработки данного проекта. С развитием ядерной энергетики и получением новых конструкционных материалов и видов топлива возможно и повышение эффективности жидкосольевых реакторов. Также, при успехе проекта и запуске промышленного реактора, будет обеспечиваться не только дожигание топлива, но и выработка электроэнергии, что делает жидкосольевые реакторы еще более привлекательными в долгосрочной перспективе.

Список литературы

1. Сидоренко В.А. Об атомной энергетике, атомных станциях, учителях, коллегах и о себе / В.А. Сидоренко – Москва: ИздАт, 2010. - 448.
2. Блинкин В.Л., Новиков В.М. Жидкосольевые ядерные реакторы / В.Л. Блинкин., В.М. Новиков – Москва: Атомиздат, 1978. - 22.
3. Лопаткин А., Третьяков И. Жидкосольевой реактор на ГКХ [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые, графические данные. М., 2020. – Режим доступа: <https://www.atomic-energy.ru/inter-views/2020/05/13/103593?ysclid=lfhcn5s1zr956341154>.
4. Ашраф О., Тихомиров Г.В. Жидкосольевые реакторы с теплым и быстрым спектром для трансмутации минорных актинидов. - Москва: МИФИ, 2020.-14.
5. Яковлев Р.М., Кузякин Ю.И. Ядерная реакторная установка с топливом-теплоносителем в виде расплавов солей фторидов.– Москва.: ФИПС, 2006. - 14.

References

1. Sidorenko V.A. About atomic energy, nuclear power plants, teachers, colleagues and about himself / V.A. Sidorenko – Moscow: IzdAt, 2010. - 448.
2. Blinkin V.L., Novikov V.M. Liquid salt nuclear reactors / V.L. Blinkin., V.M. Novikov – Moscow: Atomizdat, 1978. - 22.
3. Lopatkin A., Tretyakov I. Liquid salt reactor at GKH [Electronic resource] – Electron. text, graphic data. M., 2020. – Access mode: <https://www.atomic-energy.ru/inter-views/2020/05/13/103593?ysclid=lfhcn5s1zr956341154>.

4. Ashraf O., Tikhomirov G.V. Liquid salt reactors with thermal and fast spectrum for transmutation of minor actinides. - Moscow: MEPHI, 2020.-14.
5. Yakovlev R.M., Kuzyakin Yu.I. A nuclear reactor plant with a coolant fuel in the form of melts of fluoride salts.– Moscow.: FIPS, 2006. - 14.

УДК 658.5:621.311.25

Методы и подходы в обеспечении качественной подготовки в области ядерной энергетики

Шаповаленко В.В.¹, Павлова И.А.², Худякова В.А.³*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г. Севастополь, 299053, Россия, shapovalenkovita@rambler.ru, pavlovaira2001@mail.ru, lerakhudiakova96@gmail.com.*

Статья поступила 06.04.2023 г. ; после доработки 10.04.2023г.

Аннотация

Атомная станция (АЭС) рассмотрена как сложная человеко-машинная система, исследованы основные факторы, имеющие негативное влияние на деятельность операторов АЭС, а также проведен анализ и разбор последовательных этапов подготовки оперативного персонала.

Ключевые слова: Атомная станция, подготовка персонала, оператор АЭС, факторы, отработка навыков, обмен опытом.

Methods and approaches in providing high-quality training in the field of nuclear energy

Shapovalenko V.V.¹, Pavlova I.A.², Khudyakova V.A.³*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, shapovalenkovita@rambler.ru, pavlovaira2001@mail.ru, lerakhudiakova96@gmail.com.*

Received 06.04.2023y. ; received in final form 10.04.2023y.

Abstract

The nuclear power plant (NPP) is considered as a complex human-machine system, the main factors that have a negative impact on the activities of NPP operators are investigated, and the analysis and analysis of the successive stages of training of operational personnel is carried out.

Keywords: Nuclear power plant, personnel training, NPP operator, factors, skills development, experience exchange

Введение

После Чернобыльской аварии появилась необходимость разработки общих принципов и правил безопасности для всех стран и для всех типов атомных электростанций (АЭС). Культура безопасности входит в число основных принципов безопасности станций, без чего реализация всех других основных принципов невозможна.

Современное производство электроэнергии на атомных станциях, оснащенные сложными техническими системами, предъявляет к человеку повышенные требования в работе, а в аварийных или нештатных ситуациях - работать на пределе психофизиологических возможностей.

Сегодня в атомной промышленности успешное прогнозирование возможных ошибок операторов должно основываться на выявлении факторов, имеющих негативное влияние на операторскую деятельность.

В ядерной энергетике, как и во многих других отраслях промышленности, процент аварий по вине персонала достаточно велик, примерно половина аварийных ситуаций на АЭС, в том числе и самых серьезных.

Приведем данные о характере ошибочных действий и обстоятельствах, в которых они были совершены. Из перечня наиболее известных в мире аварий и инцидентов на АЭС следует, что 56% ошибок было совершено операторами при

работе энергоблока на различных постоянных уровнях мощности; 35% — в переходных режимах; 9% — в стояночных режимах. Подобное соотношение является типичным для большинства стран. Также отмечается, что в 43% случаев операторы действовали неправильно, а в 23% — не действовали вообще, либо производили действия слишком рано или слишком поздно [1].

По данным МАГАТЭ, в качестве основных причин возникновения проблем с безопасностью реакторов на АЭС были названы:

- Недостаточная квалификация персонала — недостаточные знания, неподходящие личностные качества, отсутствие мотивации, недостаточный объем тренажерной подготовки;
- Неадекватная информационная поддержка оперативного персонала — недостаточно полно прописаны процедуры, невысокое качество эргономической разработки пультов управления, вследствие которого оператор временами испытывает неуверенность в точности своих представлений об управляемых процессах;
- Неадекватное управление персоналом — плохая организация работы, сложность задач и их многозадачность, низкая культура безопасности, противоречивость требований к оперативному персоналу. Любое действие оператора может быть с одинаковой вероятностью истолковано и как правильное, и как ошибочное, так как далеко не всегда можно начертить четкую границу, отделяющую излишнюю перестраховку и неоправданный риск.

Решая одновременно несколько задач, оператор концентрируется на самой важной и неотложной, упуская при этом второстепенные детали происходящего и откладывая некоторые действия, о которых затем забывает.

Значительная часть аварий и инцидентов была спровоцирована непосредственно эксплуатационным персоналом: оперативным персоналом, ремонтным и обслуживающим персоналом, ошибки которого сразу или через какое-то время приводили к нарушениям технологического процесса и выходу из строя оборудования. В остальных случаях первопричиной служили: физико-химические процессы (коррозия, усталость материала и др.), приводящие к разрушению оборудования; прочие факторы (ошибки проекта, изготовления, монтажа, сбои компьютера и др.); неизвестные (не названные или невыясненные) причины.

Деятельность оператора при работе на АЭС часто осуществляется в условиях неопределенности и опасности и характеризуется высокой психологической, физической, интеллектуальной и эмоциональной нагрузкой. Именно поэтому подготовка оперативного персонала АЭС настолько важна и требует серьезного подхода.

Цель и постановка задачи

Огромное значение в области обеспечения безопасности труда, охраны окружающей среды и надежности работы оборудования и систем АЭС является подготовка персонала.

Современные АЭС — это сложные человеко-машинные комплексы, качество функционирования которых определяется должной подготовкой операторов.

Целью исследования является анализ основных методов и подходов подготовки специалистов в области ядерной энергетики.

Анализ важности подготовки оперативного персонала

Техническое образование персонала, полученное в высшем или среднем учебном заведении по ядерным специальностям, весьма необходимо, но не является достаточным для обеспечения эффективной эксплуатации АЭС.

Психофизиологическая нагрузка и круг обязанностей оперативного персонала очень велики. Оперативным персоналом обеспечивается следующий ряд обязанностей: наблюдение, диагностирование, планирование, управление процессом и контроль работы энергоблока, контроль работоспособности резервного оборудования, выполнение административных функций. При этом оперативный персонал работает по-разному в разное время суток. Высокие требования, предъявляемые к оперативному персоналу, должны учитываться на этапе отбора.

Целью обучения и подготовки персонала на АЭС является достижение им необходимого профессионального уровня знаний и практических навыков, необходимых для обеспечения безопасной эксплуатации АЭС. На сегодняшний день существует масса методов по подготовке персонала электростанций. Попробуем детально изучить этот вопрос.

Основные этапы подготовки персонала АЭС

В Российской Федерации образована и

функционирует действенная система подготовки персонала АЭС. Она включает в себя: учебную подготовку в ВУЗе, техникуме, профессионально – техническом училище и на рабочих местах подразделений АЭС; подготовку в учебно-тренировочных центрах (УТЦ), повышение квалификации и переподготовку персонала. Длительность подготовки персонала существенно зависит от исходного уровня подготовленности обучаемого.

На практике принята трехэтапная подготовка инженерного и оперативного персонала для атомных станций, схема которой представлена на рисунке 1. Ее основой служит ВУЗ, в котором обучающийся получает общую фундаментальную теоретическую подготовку. Практические аспекты будущей работы специалист получает на тренажерах в учебно-тренировочном центре и в качестве дублера или стажера на АЭС.

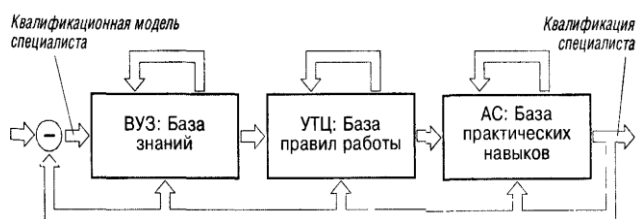


Рис.1. Модель процесса подготовки специалистов АЭС

Далее приводится анализ этапов подготовки специалиста в области атомной энергетики, от обучающегося на базе ВУЗа до оперативного персонала АЭС.

Начальная подготовка специалиста атомной энергетики на базе высшего учебного заведения

По оценкам Росатома каждый год потребность в новых специалистах в отрасли составляет около трех тысяч человек. Всего в России действует 32 программы подготовки по ядерным специальностям в более чем 20 Высших учебных заведениях (ВУЗах) страны.

На сегодняшний день существует большой выбор технических и энергетических университетов, обеспечивающих процесс подготовки специалистов для ядерной энергетики.

В таблице 1 собраны данные о ведущих университетах, выпускающих квалифицированных молодых специалистов-

энергетиков.

Таблица 1. Направления подготовки специалистов в области ядерной энергетики

Направление подготовки	Образовательные организации
Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг	1. МИФИ; 2. ТПУ; 3. СевГУ; 4. СПбПУ
Ядерная энергетика и теплофизика	1. МЭИ; 2. НГТУ
Ядерная физика и технологии	1. СПбПУ; 2. УрФУ; 3. МЭИ
Физика атомного ядра и элементарных частиц	1. СПбПУ; 2. УрГУ; 3. СФТИ НИЯУ МИФИ
Атомные электростанции и установки	1. МЭИ; 2. НГТУ; 3. СПбПУ; 4. ИАТЭ НИЯУ МИФИ

Качество подготовки студентов ежегодно поддерживается на высоком уровне. Обучающиеся проходят комплекс дисциплин прикладного характера, погружаются в профессию, знакомятся с оборудованием АЭС и их конструктивными особенностями. К окончанию образовательного процесса из учебных заведений нашей страны выходят подготовленные специалисты-энергетики, которых ожидает трудоустройство на предприятиях атомной отрасли и дальнейшее оттачивание своих знаний и умений.

В университетах обучающиеся, начиная с третьего курса, в обязательном порядке проходят учебную и производственную практики на предприятиях, таким образом, уже на начальном этапе они повышают свой профессиональный уровень.

Также большое внимание уделяется отработке студентами в тренажерных классах навыков действия оператора при работе в нормальном режиме, переходных режимах и аварийных режимах работы АЭС.

К примеру, в Институте ядерной энергии и промышленности Севастопольского Государственного Университета (ИЯЭИП СевГУ) особенностью образовательного процесса является практическая направленность подготовки студентов. В процессе подготовки используется реальное оборудование ядерных энергетических установок АЭС, учебные лаборатории «Физическая ядерная

безопасность», «Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ»; Аналитический тренажер по управлению энергоблоком АЭС с ВВЭР-1000, локальный тренажер реакторного и турбинного цехов «Клотик», класс тренажерной подготовки.

Немаловажным фактором является мотивация подготовки специалиста. Получая диплом специалиста по направлениям подготовки «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг», «Ядерная энергетика и теплофизика», «Ядерная физика и технологии» и др. для студента открывается широкий спектр предприятий для трудоустройства – это эксплуатирующие предприятия ядерного топливного цикла, куда входят предприятия по обогащению и производству ядерного топлива, предприятия по производству оборудования для АЭС, атомные электростанции, предприятия по хранению и переработке отработавшего топлива, предприятия, обеспечивающие пуск и технологическое обслуживание оборудования на АЭС, а также учреждения, занимающиеся научно-исследовательской деятельностью.

Кроме того, институты помогают обучающимся заключать целевые договоры с предприятиями, гарантирующие их дальнейшее трудоустройство по окончании образовательного учреждения.

Перечень образовательных программ повышения качества подготовки обучающихся

С целью повышения качества подготовки, выявления потенциально активных обучающихся, стремительных и заинтересованных в решении проблем атомной энергетики и развитии научного потенциала создаются специальные образовательные программы. Данные программы доступны каждому желающему и направлены на получение теоретических знаний, развитие практических навыков. Для заинтересованных обучающихся доступен ряд открытых образовательных платформ.

При поддержке общественным советом Госкорпорации «Росатом» в рамках конкурса социально-значимых инициатив был выпущен проект в виде учебного фильма «Путешествие по атомной станции» [2], в котором подробно рассказывается о принципах работы атомной и тепловой электростанций, особенностях

устройства активной зоны ядерного реактора.

В фильме проводится краткая экскурсия по центральному и машинному залам, а также по турбинному цеху.

В открытом доступе можно найти лекционные вебинары. В рамках проекта «Обнинский открытый Фестиваль науки и техники» был создан вебинар младшего научного сотрудника АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» Шлепкина А.С. [3], в котором он рассказывает о том, как работает АЭС. Повествование начинается с общих понятий физики процесса. Дальнейшее исследование идет в направлении увеличения степени важности и габаритов системы АЭС.

На официальном сайте Росатома собраны обучающие видеоролики в формате экскурсий по следующим станциям: Калининская АЭС и Кольская АЭС. Также Росатом предоставляет к изучению видеоролики формата 3D-экскурсий. В ходе подобной экскурсии можно не только наблюдать внутреннее устройство станции, но и перемещаясь по её залам, открывать интерактивную сводку информации. Стоит отметить, что в этой программе предусмотрено шумовое воспроизводство реальных установок, что позволяет ощутить полное погружение в процесс функционирования АЭС. На рисунке 2 и рисунке 3 изображены кадры с 3D-экскурсии по Ленинградской АЭС [4].

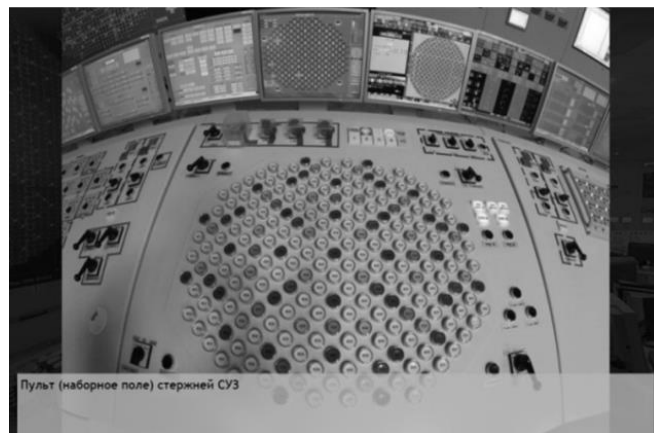


Рис.2. Пульт схемы расположения органов системы управления и защиты РБМК-1000

Ежегодно на территории Российской Федерации проводятся ряд чемпионатов, основной целью которых является вовлечение в атомную отрасль потенциального персонала, содействие выбору профессии, внедрению новых стандартов рабочих профессий на АЭС. К ним относят

чемпионаты, проводимые при поддержке крупной организации «Агентство развития профессионального мастерства WorldSkillsRussia», логотип которого изображен на рис. 4.



Рис.3. Рабочее место ведущего инженера управления реактором (ВИУР)

На сегодняшний день участие в движении WorldSkills – это визитная карточка профессиональной образовательной организации, а также показатель возможностей и потенциала будущих выпускников высших учебных заведений и перспектива в их дальнейшей профессиональной деятельности. По методике организации WorldSkills каждый год проводятся отраслевые чемпионаты формата AtomSkills. AtomSkills – это масштабное отраслевое чемпионатное движение, объединяющее все конкурсы профессионального мастерства, проводимые в атомной отрасли, и их участников – специалистов и ветеранов атомной отрасли рабочих и инженерных профессий, студентов профильных ВУЗов страны и даже школьников старших классов – в единую Экосистему подготовки и развития квалифицированных рабочих и инженерных кадров.

Для студентов проходят организованные Концерном «Росэнергоатом» интеллектуальные игры. «Атомный брейн-ринг им. Е.И. Игнатенко» – ежегодная масштабная интеллектуальная игра, участниками, победителями и призерами которой уже стали обучающиеся Ивановского государственного энергетического университета (ИГЭУ), Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Новосибирского государственного технического университета (НГТУ), Севастопольского государственного университета, Уральского энергетического университета им. Б.Н. Ельцина и Томского политехнического университета.



Рис. 4. Агентство развития профессионального мастерства WorldSkills Russia

Учебные центры

На территории РФ существует также несколько учебных центров по подготовке персонала.

Одной из таких организаций является учебно-методический центр (УМЦ) «Контроль и безопасность», который открыт на базе научно-производственного предприятия «Доза» в Зеленограде. Учебные мероприятия, проводимые УМЦ, вот уже более 10 лет являются самыми посещаемыми и авторитетными в РФ в области радиационного контроля и радиационной безопасности. Учебный центр имеет лицензию на образовательную деятельность, выданную Департаментом образования г. Москвы.

Госкорпорация «Росатом» проводит организацию дополнительного профессионального образования персонала в «Технической академии Росатома». Филиалы академии расположены в Обнинске, Санкт-Петербурге, Нововоронеже, Москве, Сосновом Бору. Академия является международным учебно-методическим центром в области физической ядерной безопасности по подготовке специалистов, контроля и физической защиты ядерных установок. Академия специализируется также на профессиональной переподготовке руководителей и специалистов атомной энергетики и промышленности, аттестации персонала.

Отработка практических навыков на базе учебно-тренажерных комплексов для работников АЭС

Тренировки персонала АЭС проводятся, в основном, на тренажерах, имитирующих функционирование реального технологического объекта управления (ТОУ). Цель этих тренировок -

научить оператора функциям управления объектом не только в штатных ситуациях, но и при аномальном развитии событий.

На сегодняшний день учебно-тренировочный центр (УТЦ) – это современный учебный комплекс, оснащенный новейшей техникой, в том числе функциональными реалистичными тренажерами реакторного отделения, турбинного отделения, комплексного электротехнического оборудования с использованием его реальных фрагментов.

Основные задачи, которые решаются учебно-тренировочным центром:

- Организация всей работы по подготовке, переподготовке, поддержанию профессионального мастерства и повышению квалификации персонала;
- Разработка и предоставление необходимого учебно-методического материала;
- Проведение занятий и тренировок оперативного персонала с использованием технических средств;
- Проведение социологических и социально – психологических исследований в трудовых коллективах.

Приведем в пример УТЦ Курской атомной станции, которая является первенцем среди аналогичных подразделений АЭС, входящих в Концерн «Росэнергоатом».

Подготовку операторов ведут опытные, высококвалифицированные специалисты атомной станции.

Особое внимание уделяется работникам, занятым управлением технологическими процессами АЭС. Из числа оперативного персонала Курской станции за последние пять лет были подготовлены на должность более 450 человек.

В арсенале УТЦ – шесть тренажеров, в том числе, полномасштабные тренажеры блоков-прототипов № 2 и № 4, тренажер разгрузочно-загрузочной машины.

В центре применяются и другие технические средства обучения, которые постоянно пополняются и обновляются.

Для учебно-тренировочных центров (УТЦ) в разделах сохранения знаний в ядерной энергетике создаются обучающие видеоматериалы, которые описывают технологический процесс ремонта узла оборудования.

Подготовка и переподготовка персонала на тренажерах незаменимы для повышения эксплуатационной безопасности станций, знаний и мастерства персонала, необходимых для управления АЭС в нормальных и аварийных режимах.

Обмен опытом

Организации, входящие в состав Госкорпорации, на сегодняшний день ведут активную работу по обеспечению обмена опытом персонала не только между российскими станциями, но и за рубежом. Так, сотрудники АО «Атомтехэнерго» имеют возможность получения ценного опыта работы в Иране на АЭС «Бушер», Китае на «Таньваньской АЭС», в Индии на «АЭС «Куданкулам», в Белоруссии на «Белорусская АЭС», в Финляндии на АЭС «Ханхикиви», в Венгрии на АЭС «Пакш». Работа специалистов АО «Атомтехэнерго» на площадках АЭС с разными проектами делает их специалистами высочайшего уровня.

Готовность к зарубежной работе постоянно повышается. Основная задача АО «Атомтехэнерго» – сформировать, подготовить, удерживать и развивать все ключевые компетенции специалистов.

Заключение

В ходе исследования был проведен анализ основных факторов, влияющих на эффективную работу оперативного персонала АЭС. Результаты показали, что наличие эмоционального напряжения, утомления или же стресса играют значительную роль в качестве работы сотрудников и могут привести к совершению ошибочных действий. Также, изучив важность подготовки оперативного персонала, были структурированы и приведены основные этапы подготовки операторов АЭС.

Список литературы

1. Башлыков А.А. Основы конструирования интеллектуальных систем поддержки принятия решений в атомной энергетике. – 93
2. <https://www.youtube.com/watch?v=iI1JILbc4> – учебный фильм «Путешествие по атомной станции»
3. https://www.youtube.com/watch?v=54VtFZ_enmM&t=569s – «Просто о сложном или как работает атомная электростанция»
4. https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sa-ut-leningradskoy-aes/3d-excursion/ - сайт Росатома
5. Анохин А.Н., Острейковский В.А. Вопросы эргономики в ядерной энергетике. - Москва: Энергоатомиздат, 2001. – 55-56
6. Алонцева Е.Н., Эргономика и проблемы управления сложными объектами, г. Обнинск – 3
7. Ларкин Я.Ю. Значение человеческого фактора в управлении эксплуатацией ЯЭУ АЭС.
8. Опарина Н.М. Подготовка специалистов,

безопасность АЭС и человеческий фактор, 2015.
- 1

9. Э. Сватон, В. Небойян и Л. Ледерман
Человеческий фактор в эксплуатации атомных
электростанций
10. РЭА, Ежемесячный журнал атомной энергетики
России №09 2018г. – 28-31

References

1. Bashlykov A.A. Fundamentals of designing intelligent decision support systems in the nuclear power industry. – 93
2. <https://www.youtube.com/watch?v=iI1JILlbc4> – educational film "Journey through the nuclear power plant"
3. https://www.youtube.com/watch?v=54VtFZ_enmM&t=569s – "Just about complicated or how a nuclear power plant works"
4. https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-leningradskoy-aes/3d-excursion/ / - Rosatom website
5. Anokhin A.N., Ostreikovsky V.A. Questions of ergonomics in nuclear power engineering. - Moscow: Energoatomizdat, 2001. – 55-56
6. Alontseva E.N., Ergonomics and management problems of complex objects, Ob-ninsk – 3
7. Larkin Ya.Yu. The importance of the human factor in the management of nuclear power plant operation.
8. Oparina N.M. Training of specialists, NPP safety and the human factor, 2015. - 1
9. E. Sutton, V. Neboyan and L. Lederman The human factor in the operation of nuclear power plants
10. REA, Monthly Journal of Nuclear Energy of Russia No.09, 2018 – 28-31

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.311(075.8):004.7

Применение блокчейна в сотовой энергетике

Н.М.Веселова¹, В.И.Карапузов¹, М.А. Черноусова², Г.В. Комиссаров¹¹ФГБОУ ВО «Волгоградский технический университет», Институт архитектуры и строительства,
ул. Академическая-1, г. Волгоград, 400074, Россия, e-mail: veselovanm28@gmail.com, karapuzova_ny@mail.ru²ФГБОУ ВО «Волгоградский аграрный университет», пр-т Университетский-26,
г. Волгоград, 400002, Россия, e-mail: mariya.vasileva@inbox.ru

Статья поступила 05.05.2023 г.; после доработки 06.05.2023 г.

Аннотация

В работе рассмотрено применение блокчейна в сотовой энергетике для отслеживания энергетических потоков и потерь электроэнергии в сети в ходе транзакций, для обеспечения соответствия между физическим состоянием микро энергетической системы и возможными затратами потребителей электроэнергии; проведены математические эксперименты для тестовой системы с тремя генераторами и шестью узлами потребления мощности. Полученные результаты показали, что проведение энергетических транзакций в микросети меняет распределение потерь электроэнергии по пути следованию потока мощности.

Ключевые слова: сотовая энергетика, микросети, блокчейн, энергетическая транзакция, потокораспределение, потери активной электроэнергии.

The use of block chain for cellular energy

N.M. Veselova¹, V.I. Karapuzov¹, M.A. Chernousova², G.V. Komissarov¹¹ Volgograd Technical University, Institute of Architecture and Construction, Akademicheskaya-1, Volgograd, 400074,
Russia, e-mail: veselovanm28@gmail.com, karapuzova_ny@mail.ru² Volgograd Agrarian University, 26 Universitetskiy Ave., Volgograd, 400002, Russia,
e-mail: mariya.vasileva@inbox.ru

Received 05.05.2023 y.; received in final form 06.05.2023 y.

Abstract

The paper considers the use of block chain in cellular energy to track energy flows and electricity losses in the network during transactions, to ensure compliance between the physical state of the micro energy system and the possible costs of electricity consumers; mathematical experiments were out performed for a test system with three generators and six power consumption nodes. The results obtained showed that conducting energy transactions in a micro grid changes the distribution of electricity losses along the path of following the power flow

Keywords: cellular power engineering, micro grids, block chain, energy transaction, flow distribution, active electricity losses

Введение

В нашей стране все чаще на удаленных территориях создаются микросети со своей автономной генерацией. Объединение островных генерирующих мощностей в единый кластер (сотовую энергетику) позволит создать подсети нового

формата со своей макроэкономикой. Также сотовая энергетика позволяет сразу разрешить все имеющиеся задачи электрификации того или иного потребителя, в то же время значительно снижая затраты на транспортировку электроэнергии [1].

Одно из преимуществ микроэнергетики заключается в том, что владелец источника энергии может выступать как в роли потребителя, так и в роли поставщика энергии, продавая ее излишки через общую сеть.

Новые технологии электроснабжения, применение распределенной и островной генерации создают предпосылки для новых взаимоотношений между потребителями и поставщиками электроэнергии. Энергетический рынок из-за перегруженности требует резкого сокращения времени, затрачиваемого на экономические операции по продаже-покупке электроэнергии. Кроме того, в сотовой энергетике обмены энергией и платежи по ним не должны напрямую зависеть от рынка электроэнергии и банковских служб. Для решения проблемы регистрации перетоков электроэнергии между островными микросетями и осуществления платежей по ним возможно применение механизма блокчейна.

Постановка задачи

Рассмотрим возможность адаптирования технологии блокчейна для энергетических перетоков микросетей.

Блокчейн – это один из видов распределенного хранения данных, который может быть использован для записи и отслеживания любой информации. Впервые данный метод был использован для криптовалюты. Одной из особенностей блокчейна является децентрализованное хранение информации, которую можно просматривать, добавлять, но не исправлять, так как сеть в которой они хранятся контролируется всеми участниками. Следовательно, при помощи блокчейна можно осуществлять транзакции между одноранговыми узлами без посредников – банков. Многие криптовалюты основаны на технологии блокчейн, которая позволяет осуществлять транзакции не только денежных потоков.

В нашем случае блокчейн позволяет участникам сотовой энергетике отслеживать все энергетические перетоки, которые могут происходить в сети. Все участники поддерживают копию блокчейна и могут проверять свои блоки. После внесения информации по перетокам в блок, она уже не может быть исправлена, так как механизм проверки блокчейна выявит любое вмешательство. Технология блокчейна обеспечивается следующими элементами:

- механизмами проверки;
- сетью передачи данных для совместного использования информации.

На рис. 1 представлена упрощенная схема

энергетического блокчейна.

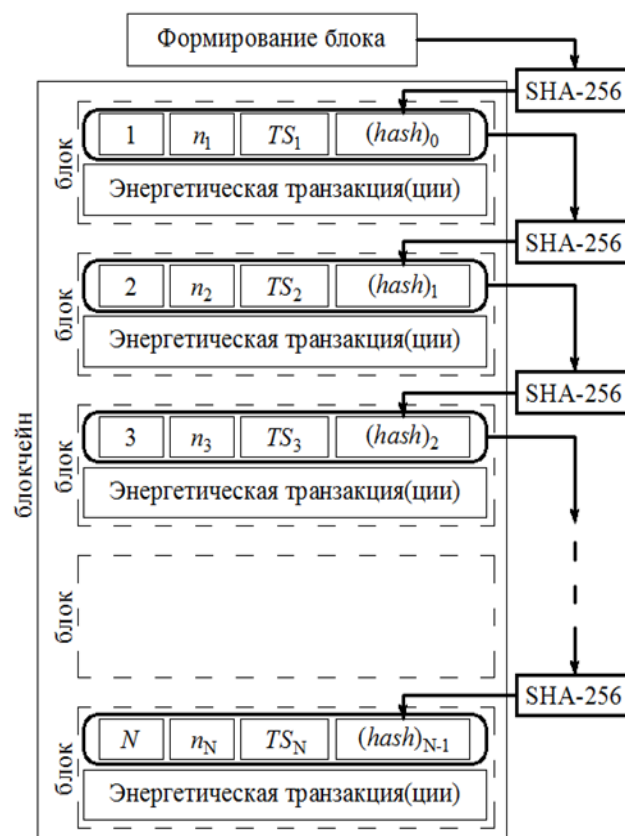


Рис. 1. Упрощенная схема энергетического блокчейна

На рис. 1 блокчейн представлен в виде реестра блоков, где каждый блок содержит одну или несколько транзакций, совершенных в определенное время. В случае покупки или продажи электроэнергии блоки могут быть организованы в виде таблиц, содержащих подробную информацию: источник энергии, мощность (нагрузка, кВА), передаваемая энергия (кВт·ч), метка времени, продолжительность (ч), потребленная мощность (кВт), поток реактивной мощности (кВар·ч), рассчитанные/измеренные потери электроэнергии.

Каждый из блоков блокчейна содержит заголовок и поле данных. Заголовок содержит строку, которая идентифицирует блок и получена из предыдущего блока с использованием безопасного алгоритма хеширования SHA-256 [2]. Это необходимо для проверки достоверности. Алгоритмы SHA-2 принимают на входе сообщение переменной длины и создают дайджест сообщения, информационный след, имеющий фиксированную длину, которая на рис. 1 показана, как hash. Безопасность алгоритма хеширования заключается в том, что хеш-функция однонаправленная и

необратимая, и также не существует возможности создать два разных сообщения одним и тем же дайджестом. Так дайджест в SHA-256 включает в себя идентификатор блока 1,2,3...N (для защиты от изменения порядка блоков), одноразовый номер n , метку времени TS , транзакцию(ции) и копию хеша предыдущего блока. Одноразовый номер n присваивается таким образом, чтобы полученный хеш проверял определенные условия (например, то что он должен начинаться заданного числа нулей или единиц). В случае, если даже один из битов одного или несколько блоков будет изменен, то хеш тоже измениться и блок больше не будет считаться действительным. Таким образом, любое вмешательство в блок создает недопустимые условия для всех последующих блоков.

Применение блокчейна в области энергетики с технической точки зрения вызывает некоторые проблемы. Так, хорошо известно, что отпуск электроэнергии от источника (генерации) потребителям мощности физически может не соответствовать потокам энергии, определяемых при их отслеживании, что характерно для хорошо развитых электрических сетей. Но даже при применении малых систем с распределенной генерацией с системами поддержания напряжения в узлах имеется большая циркуляция реактивной мощности. Поэтому в системе после запуска транзакции предварительно проверяется ее физическая осуществимость, то есть является она жизнеспособной или нет в текущем состоянии системы (рис. 2).

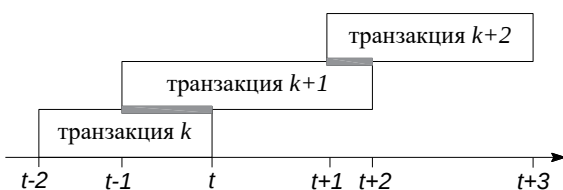


Рис. 2. Влияние энергетических транзакций на условия эксплуатации

Согласно рис. 2, транзакция в блоке k что генератор t продает электроэнергию потребителю j . Через некоторое время запускается следующая транзакция и в сети создается новый поток между генератором j и потребителем f . Последняя транзакция может вызвать нелинейную связь потоков, если их пути между генераторами и потребителями мощности имеют наложение. Таким образом возникновение нового распределения потока может изменить эффективность системы распре-

деления (либо увеличить, либо снизить технические потери электроэнергии). Это положение основано на том, что для каждой новой транзакции энергии предполагается, что задействованный в этой транзакции генератор рассматривается как VD – базисно-балансирующий узел, а остальные генераторы задаются как PV – генераторные узлы. В этом случае для определения эффективности транзакции могут быть предприняты следующие шаги:

- мощности генераторов, не участвующих в новой транзакции, принимаются равными значениям из предыдущей транзакции (блока), а самим узлам присваивается тип генераторных;
- нагрузку сети увеличивается на указанную величину, кВт;
- рассчитывается поток нагрузки, принимая задействованный генератор в транзакции как базисно-балансирующий узел;
- определяется распределение потоков и вклад каждого генератора в нагрузку сети и технические потери в каждой ветви;
- - производится оценка количественного изменения потерь активной энергии в новой транзакции энергии.

Таким образом, одним из основных этапов процедуры проверки осуществимости транзакции является отслеживание потока мощности (нагрузки). То есть отслеживание потоков мощности является инструментом, используемым для анализа энергетических сетей, поскольку он позволяет определить вклад каждого энергоблока в потоки электроэнергии в линиях электропередачи.

Эти методы могут быть применены после определения потока нагрузки, следовательно, для итога каждой транзакции можно выдвинуть заранее набор гипотез о генерации и нагрузках.

Современные исследования энергетических систем имеет множество работ, в которых представлены алгоритмы отслеживания мощности, но все они основаны на пропорциональном распределении потоков мощности [3, 4]. Согласно этому принципу распределения для i -го узла системы вклад притока мощности, входящий по линии j в отходящий поток мощности пропорционален соотношению мощности, поступающей по линии j , и общего потока мощности в узле i . Принцип пропорционального распределения потоков мощности представлен на рис. 3.

Этот принцип будет характеризовать совместное использование перетоков, поэтому для данного распределения легко можно выполнить

вычисления перетока мощности.

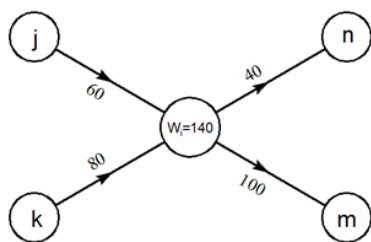


Рис. 3. Схема пропорционального распределения потоков мощности

Перетоки мощности для схемы рис.3:

$$\text{из } j \text{ в } n \quad W_{n(j)} = 40 \cdot \frac{60}{140} = 17,14;$$

$$\text{из } k \text{ в } n \quad W_{n(k)} = 40 \cdot \frac{80}{140} = 22,86;$$

$$\text{из } j \text{ в } m \quad W_{m(j)} = 100 \cdot \frac{60}{140} = 42,86;$$

$$\text{из } k \text{ в } m \quad W_{m(k)} = 100 \cdot \frac{80}{140} = 57,14.$$

Принцип совместного использования перетоков, рассмотренный выше широко используется для отслеживания энергетических потоков [5, 6]. Однако для расчета потоков электроэнергии он требует первоначального задания вводных данных, таких как: мощность узлов потребления, мощность узлов генераторов, подключенных к сети; потоки мощности для каждой линии и трансформатора.

Описание исследования

Рассмотрим три варианта микросетей 10кВ, состоящей из 9 узлов (рис. 4). В первом случае все линии электропередачи выполнены кабелями, во втором случае сеть имеет как воздушные, так и кабельные линии электропередачи, в третьем – все линии воздушные. Присоединенные генераторы солнечных электростанций (СЭС) имеют одинаковую установленную мощность. В рабочем режиме линия 7-9 – разомкнута, перетоки энергии осуществляются по линиям 7-8 и 8-9. Омические характеристики сопротивлений сетей представлены в табл. 1.

Следует отметить, что для сетей более высокого напряжения при расчетах перетока мощности необходимо учитывать все составляющие схемы замещения сетей.

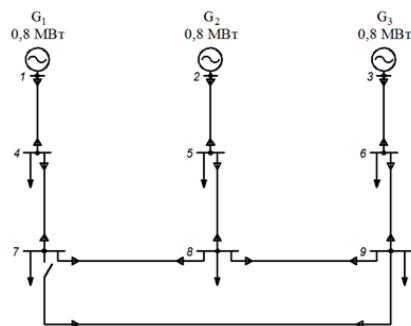


Рис. 4. Топология тестовой системы

Таблица 1. Характеристика сетей

Участок сети	Вариант А		Вариант В		Вариант С	
	R, Ом	X, Ом	R, Ом	X, Ом	R, Ом	X, Ом
1-4	1,282	0,162	1,282	0,162	1,156	0,760
2-5	1,923	0,242	1,734	1,140	1,734	1,140
3-6	2,051	0,258	1,850	1,216	1,850	1,216
4-7	1,154	0,145	1,154	1,154	1,040	0,684
5-8	1,282	0,162	1,156	0,760	1,156	0,760
6-9	1,603	0,202	1,445	0,950	1,445	0,950
7-8	0,641	0,081	0,641	0,081	0,578	0,380
8-9	0,641	0,081	0,641	0,081	0,578	0,380

Продолжение таблицы 1

Узел	Тип	R, МВт	Q _{г min} , МВар	Q _{г max} , МВар	P _н , МВт	Q _н , МВар
1	V δ	балансировочный	–	–	–	–
2	P V	генераторный	0,8	–0,4	0,4	–
3	P V	генераторный	0,8	–0,4	0,4	–
4	P Q	нагрузочный	–	–	0,43	0,19
5	P Q	нагрузочный	–	–	0,40	0,16
6	P Q	нагрузочный	–	–	0,45	0,20
7	P Q	нагрузочный	–	–	0,26	0,15
8	P Q	нагрузочный	–	–	0,34	0,21
9	P Q	нагрузочный	–	–	0,51	0,24

Результаты нулевой транзакций для тестовой сети для варианта А представлены на рис. 5, а и б.

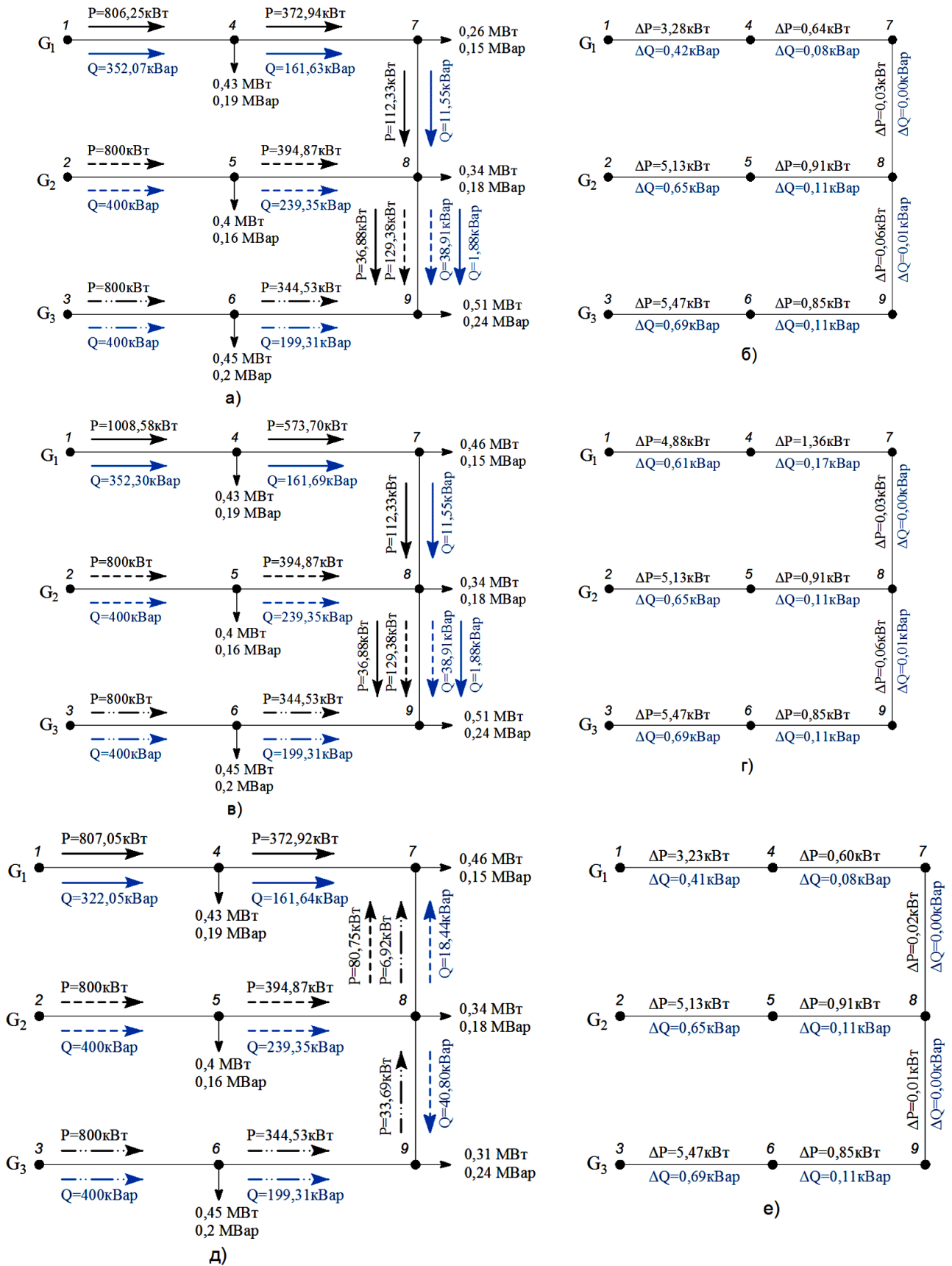


Рис. 5. Перетоки и потери мощности в транзакциях для варианта А

Предположим, что в первой транзакции потребитель в узле 7 осуществляет покупку электроэнергии 200кВт·ч с 11.00 до 12.00 с шин генератора G1 (рис. 5, в и г). Во второй транзакции потребитель в узле 9 снижает потребление электроэнергии с 12.00 до 13.00 на 200кВтч (рис. 5, д и е).

Для остальных вариантов рассматриваемой микросети можно получить транзакции по аналогии. Обобщенные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2. Обобщенный результат потерь активной энергии для транзакций в сети

	Активные потери			
	Генера- тор 1	Генера- тор 2	Генера- тор 3	Об- щие
<i>Транзакция 0</i>				
Путь	(1-4-7-8-9)	(2-5-8-9)	(3-6-9)	
Вариант А	3,984	6,088	6,316	16,388
Вариант В	3,958	5,492	5,692	15,142
Вариант С	3,570	5,486	5,692	14,748
<i>Транзакция 1</i>				
Путь	(1-4-7-8-9)	(2-5-8-9)	(3-6-9)	
Вариант А	6,277	6,088	6,316	18,681
Вариант В	6,247	5,492	5,692	17,431
Вариант С	5,395	5,486	5,692	16,573
<i>Транзакция 2</i>				
Путь	(1-4-7)	(2-5-8-7)	(3-6-9-8-7)	
Вариант А	3,829	6,052	6,323	16,204
Вариант В	3,833	5,459	5,699	14,991
Вариант С	3,458	5,458	5,699	14,615

Сравнение этих вариантов систем позволяет сделать следующие выводы:

- задействованные потоки реактивной мощности имеют достаточно большие значения и зависят от структуры сети и вырабатываемой активной мощности СЭС;
- потери электроэнергии имеют разные значения в каждой энергетической транзакции;
- в каждой энергетической транзакции в режиме реального времени можно отнести величину потерь электроэнергии к потоку мощности с помощью применения алго-

ритма отслеживания, основанного на пропорциональном распределении.

Заключение

Из приведенного примера следует, что, не смотря на увеличение потребления мощности, увеличения загрузки сети и потерь активной энергии, каждая новая подача активной энергии в сеть (новая транзакция) снижает суммарные потери энергии в сети за счет изменения коэффициента мощности и это должно учитываться при технико-экономической оценке соответствующей транзакции.

Так, например, транзакция при покупке энергии, которая устанавливается между пользователем и генератором, определяет в целом в ветвях, включенных в путь от генератора к нагрузке, увеличение потоков мощности по сравнению с предыдущей ситуацией и как следствие потерь энергии. И наоборот, при транзакции снижения величины покупаемой энергии в ветвях, включенных в путь наблюдается снижение потоков мощности и снижение потерь. Это изменяет значение напряжений в узлах и перераспределению потоков энергии, следуя их электрическим характеристикам.

Таким образом, применение блокчейна позволит отслеживать потокораспределение в транзакциях и потери электроэнергии, отнесенные к определенному генератору, в реальном времени.

Список литературы

1. Веселова, Н.М. Кластерный подход в генерации электроэнергии для потребителей АПК / Н.М. Веселова // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию окончания Сталинградской битвы: «Мировые научно-технологические тенденции социально-экономического развития АПК и сельских территорий», Волгоград, 31 января – 02 февраля 2018 года. – Волгоград: Волгоградский государственный аграрный университет, 2018. – С. 417-422.
2. Н. Gilbert, Н. Handschuh, Security Analysis of SHA-256 and Sisters [Electronic resource]: Lecture Notes in Computer Science, LNCS 3006, Selected Areas in Cryptography, pp. 175-193, 2004. – URL: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-24654-1_13.pdf (date of application 27.01.2022).
3. Бердин, А.С. Формирование параметров модели ЭЭС для управления электрическими режимами /А.С. Бердин, П.А. Крючков. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 108 с.
4. W. Shuai, L. Jie-Feng and Y. Cheng-Hao, "Calculation Method of Transmission Allocation Based on

Proportional Power Flow Tracing," 2021 IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE), 2021, pp. 22-26; doi: 10.1109/REPE52765.2021.9617116.

5. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д., Исаева Т.М., Игендеров Ф.Г. Об адресном распределении мощностей в электрических сетях // Программные продукты и системы. 2016; doi: 10.15827/0236-235X.113.126-133.
6. C. Li, D. Wu and Y. Guizhong, The research of power flow tracing analytical algorithm, China International Conference on Electricity Distribution, pp. 1-4, September 2012; doi:10.1109/CICED.2012.6508574.

References

1. Veselova, N.M. Klasternyj podhod v generacii elektroenergii dlya potrebitelej APK. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii, posvyashchennoj 75-letiyu okonchaniya Stalinskoy bitvy* [Mirovye nauchno-tehnologicheskie tendencii social'no-ekonomicheskogo razvitiya APK i sel'skih territorij], Volgograd, Volgogradskij gosudarstvennyj agrarnyj universitet Publ., 2018. – pp. 417-422.
2. Gilbert H., Handschuh H., Security Analysis of SHA-256 and Sisters. *Lecture Notes in Computer Science*, [Selected Areas in Cryptography], 2003, LNCS 3006, pp. 175-193. Available at: https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2F978-3-540-24654-1_13.pdf.
3. Berdin, A.S., Kryuchkov P. A. Formirovaniye parametrov modeli EES dlya upravleniya elektricheskimi rezhimami [Formation of parameters of the EES model for control of electrical modes]. Yekaterinburg, UGTU Publ., 2000. – 108 p.
4. Shuai W., Jie-Feng L. and Cheng-Hao Y., Calculation Method of Transmission Allocation Based on Proportional Power Flow Tracing. *IEEE 4th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering* [Renewable Energy and Power Engineering (REPE)], 2021, pp. 22-26; doi: 10.1109/REPE52765.2021.9617116.
5. Balametov A.B., Halilov E.D., Isaeva T.M., Isgenderov F.G. Ob adresnom raspredelenii moshchnostej v elektricheskix setyah. *Programmnye produkty i sistemy* [Komp'yuternye i informacionnye nauki, Elektrotehnika, elektronnaya tekhnika, informacionnye tekhnologii], 2016; doi: 10.15827/0236-235X.113.126-133.
6. Li C., Wu D. and Guizhong Y. The research of power flow tracing analytical algorithm. *The 5th China International Conference on Electricity Distribution* [China International Conference on Electricity Dis-tribution (CSEE)], 2012, pp. 1-4; doi:10.1109/CICED.2012.6508574.

УДК 620.92

Анализ эксплуатационных режимов систем электроснабжения с распределенной генерацией и потреблением

Л.Н. Канов, С.А. Конева, А.К. Пронина, Е.Н. Ходак

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, lkanov48@mail.ru

Статья поступила 03.04.2023 г.; после доработки 04.04.2023 г.

Аннотация

Представлена возможность численного моделирования системы распределенного асинхронного электропривода, состоящего из асинхронных двигателей, получающих питание от удаленных источников через кабели. Построена математическая модель системы электропривода, состоящей из синхронных генераторов, трансформатора, асинхронных электродвигателей и статической нагрузки. Показано, что для повышения точности расчетов кабели целесообразно представлять линиями с распределенными по длине параметрами. Описан алгоритм составления уравнений модели, приведены примеры расчета типичных режимов.

Ключевые слова: синхронный генератор, асинхронный электродвигатель, трансформатор, распределенный электропривод, кабельная линия, математическое моделирование, напряжение, ток, нагрузка, процесс пуска.

Analysis of the operating modes systems of electric supply with the up-diffused generation and consumption

L.N. Kanov, S.A. Koneva, A.K. Pronina, E.N. Hodak

Sevastopol State University, 33, Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia, lkanov48@mail.ru

The article acted 03.04.2023 y.; after a revision 04.04.2023 y.

Abstract

Possibility of numeral design of the system of the up-diffused asynchronous electromechanic, consisting of asynchronous engines, recipient a feed from remote through cables is presented. The mathematical model of the system of electromechanic, consisting of remote synchronous generator, transformer, asynchronous electric motors and static loading is built. It is showed that for the increase of exactness of calculations it is expedient to present cables lines with the parameters up-diffused on length. The algorithm of drafting of equalizations of model, examples of calculation of the typical modes, is described..

Keywords: synchronous generator, asynchronous electric motor, transformer, up-diffused electromechanic, cable bus, mathematical design, tension, current, loading, starting process.

Введение

На современных крупных транспортных, горных, портовых предприятиях, судах электро-энергетические системы представляют сложные распределенные совокупности генераторов, трансформаторов и электроприводов, объединенных кабельными сетями. То же относится к

шахтным электроэнергетическим системам большой протяженности, оффшорным ветро и волновым электростанциям. Тенденция роста мощностей используемых агрегатов и наличия длинных кабельных линий приводит к необходимости учета влияния изменений режима одного из устройств на состояние остальных и системы

в целом [1, 2]. Расчет подобных систем выполняется с использованием математических моделей электрических машин, связанных кабелями, в которых учитываются эквивалентные сопротивления и индуктивности жил кабелей [3]. Задачам анализа поведения подобных систем в эксплуатационных режимах (пуск, наброс нагрузки, короткие замыкания, коммутации) посвящены многие работы, например, [1 – 9].

В работах Ещина Е.К. [1, 2] исследовано управление группой двигателей, соединенных кабелями с учетом емкостей кабелей. В [4 – 9] выполнен анализ режимов двухдвигательных электроприводов при изменении частоты напряжения с помощью преобразователей частоты. Исследования выполняются методом имитационного моделирования в среде *MatLab*.

К настоящему времени актуальной является задача расчета электроэнергетической системы электроприводов с учетом длин и всех параметров кабелей, рассматриваемых как цепи с распределенными параметрами [6 – 9].

Целью настоящей статьи является построение методики расчета и анализ основных эксплуатационных режимов распределенных электроэнергетических систем, содержащих синхронные генераторы, трансформаторы, асинхронные двигатели, длинные кабельные линии при пусках, включениях и отключениях нагрузок коротких замыканиях, разрывах.

Для достижения этой цели построена математическая модель системы распределенного электропривода, и выполнен анализ характерных эксплуатационных режимов при различных коммутациях и взаимном влиянии агрегатов системы.

Описание основных элементов распределенной системы электроснабжения

Уравнения электрической динамики синхронного генератора, ротор которого вращается с угловой скоростью ω без учета демпфирующих контуров в ортогональной вращающейся системе координат имеют вид

$$\left. \begin{aligned} U_{sd} &= -r_s I_{sd} + \omega L_{sq} I_{sq}; \\ U_{sq} &= -r_s I_{sq} - \omega L_{sd} I_{sd} - \omega M_f I_f, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где r_s , L_s – сопротивление и индуктивность фазы обмотки статора; U_{sd} , U_{sq} , I_{sd} , I_{sq} – составляющие напряжений и токов обмотки статора; M_f – коэффициент взаимной индукции;

I_f – ток возбуждения.

Ограничимся рассмотрением синхронного неявнополюсного генератора при $L_{sq} = L_{sd} = L_s$. Трактуя вещественные составляющие напряжения и тока статора как продольные проекции векторов, а мнимые составляющие – как поперечные проекции, и домножая второе уравнение в (1) на мнимую единицу, объединим эти уравнения в одно комплексное уравнение

$$U_s + (r_s + j\omega L_s) I_s = -j\omega M_f I_f. \quad (2)$$

здесь $r_{sk} + j\omega L_{sk} = Z_k$ – комплексное сопротивление обмотки статора; k – номер генератора в системе.

Комплексные уравнения на фазу понижающего трансформатора с обмотками w_1 , w_2 представляются следующим образом

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{t1} &= (r_{t1} + j\omega L_{t1}) \dot{I}_{t1} - j\omega M_{t12} \dot{I}_{t2}; \\ -\dot{U}_{t2} &= (r_{t2} + j\omega L_{t2}) \dot{I}_{t2} - j\omega M_{t21} \dot{I}_{t1} \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

Коэффициент трансформации полагаем $n = \frac{w_1}{w_2} > 1$, тогда $L_{t2} = \frac{L_{t1}}{n^2}$ и

$M_{t21} = M_{t12} = \frac{L_{t1}}{n}$ – коэффициент взаимной индукции. Комплексные сопротивления обмоток трансформатора

$$Z_{t1} = r_{t1} + j\omega L_{t1},$$

$$Z_{t2} = r_{t2} + j\omega L_{t2}.$$

Принятая однолинейная схема трансформатора изображена на рис.1.

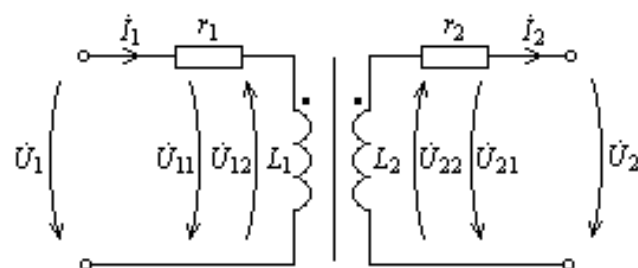


Рис.1. Трехфазный понижающий трансформатор

Уравнения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором в ортогональной системе координат dq с опережающим вращением поперечной оси имеют вид [10]

$$\left. \begin{aligned} U_{cd} &= -\omega(L_c i_{pq} + L_{ad} i_{pd}) + r_c i_{cd}; \\ U_{cq} &= \omega(L_c i_{cd} + L_{ad} i_{pd}) + r_c i_{cq}; \\ 0 &= -(\omega - p\Omega)(L_p i_{pq} + L_{ad} i_{cq}) + r_p i_{pd}; \\ 0 &= (\omega - p\Omega)(L_p i_{pd} + L_{ad} i_{cd}) + r_p i_{pq} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

В этих уравнениях ω – частота напряжения статора; Ω – угловая скорость вращения ротора; p – число пар полюсов; r_c, r_p, L_c, L_p – сопротивления и индуктивности статора и ротора; L_{ad} – взаимная индуктивность. Полагаем, что вещественные части токов и напряжений статора и ротора являются проекциями соответствующих векторов на продольную координатную ось d , а мнимые части – на поперечную ось q

$\dot{U}_c = U_{cd} + jU_{cq}$; $\dot{I}_c = i_{cd} + ji_{cq}$;
 $\dot{I}_p = i_{pd} + ji_{pq}$ и что в двигателе с короткозамкнутым ротором $U_{cq} = 0$. Система уравнений (4) преобразуется теперь в два комплексных алгебраических уравнения, так как механическая инерция асинхронного двигателя существенно преобладает над электромагнитной

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_c &= (r_c + j\omega L_c)\dot{I}_c + j\omega L_{ad}\dot{I}_p; \\ 0 &= (r_p + j(\omega - p\Omega)L_p)\dot{I}_p + j(\omega - p\Omega)L_{ad}\dot{I}_c. \end{aligned} \right\}$$

Отсюда получаем выражение для тока статора

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{r_c + j\omega L_c + \frac{\omega L_{ad}^2(\omega - p\Omega)}{r_p + j(\omega - p\Omega)L_p}} \quad (5)$$

и тока ротора

$$\dot{I}_p = \frac{-j\dot{I}_c \cdot (\omega - p\Omega)L_{ad}}{r_p + j(\omega - p\Omega)L_p}.$$

Знаменатель выражения (5) представляет входное сопротивление асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором

$$\underline{Z}_{AD} = r_c + j\omega_k L_c + \frac{\omega_k L_{ad}^2(\omega_k - p\Omega)}{r_p + j(\omega_k - p\Omega)L_p}, \quad (6)$$

зависящее от скорости его вращения Ω .

Уравнение механической динамики ротора имеет вид баланса моментов

$$J \frac{d\Omega}{dt} + k_{TP}\Omega + M_H(\Omega) = M_{ЭМ}, \quad (7)$$

здесь k_{TP} – коэффициент трения; $M_H(\Omega)$

– момент сопротивления нагрузки; электромагнитный момент $M_{ЭМ} = L_{ad}(i_{cq}i_{pd} - i_{cd}i_{pq})$.

Кабельные линии, соединяющие элементы системы, представляют собой электрические цепи с распределенными параметрами [11]. На рис.2 показана однолинейная схема замещения участка кабеля длиной dx , где обозначены r_0, L_0, g_0, C_0 – удельные сопротивление, индуктивность, проводимость и емкость на единицу длины.

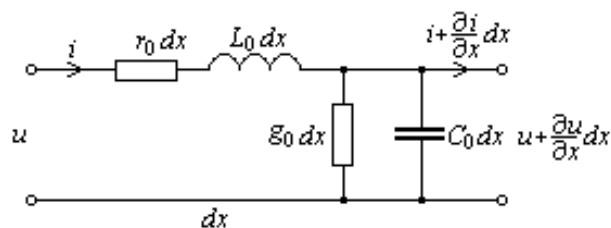


Рис.2. Схема замещения участка кабельной линии

Выражения напряжения и тока на фазу линии имеют вид

$$\left. \begin{aligned} U(x) &= \underline{A}_1 e^{-\gamma x} + \underline{A}_2 e^{\gamma x}; \\ \dot{I}(x) &= \frac{\underline{A}_1 e^{-\gamma x} - \underline{A}_2 e^{\gamma x}}{\underline{Z}_B}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $\underline{\gamma} = \sqrt{(r_0 + j\omega L_0)(g_0 + j\omega C_0)}$ – коэф-

фициент распространения; $\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{r_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}}$ –

волновое сопротивление линии; $\underline{A}_1, \underline{A}_2$ – комплексные коэффициенты, определяемые из граничных условий на концах кабеля. Через x обозначена координата по длине кабеля: в начале кабеля $x = 0$, в конце $x = l$.

Математическая модель распределенной системы электроснабжения

На рис.3 изображена упрощенная блок-схема математической модели распределенной системы электроснабжения.

Генерирующая часть системы состоит из трех синхронных генераторов $CG1, CG2$ и $CG3$ с внутренними сопротивлениями Z_{BH1}, Z_{BH2} и Z_{BH3} , работающие на общую шину высокого напряжения через кабельные линии 1, 2 и 3. Через понижающий трансформатор по кабелю t напряжение подается на шины низкого напряжения, к которым через кабели 4, 5 и 6 подсоединены асинхронные двигатели $AD4, AD5, AD6$.

Координата x отсчитывается сверху вниз по длине кабеля. Через кабель 7 подсоединена статическая нагрузка R_7 . Длины кабелей обозначены через $l_1, l_2, \dots, l_8, l_t$. Согласно (8) для определения токов и напряжений в кабелях следует определить 18 коэффициентов $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{81}, A_{82}, A_{t1}, A_{t1}$.

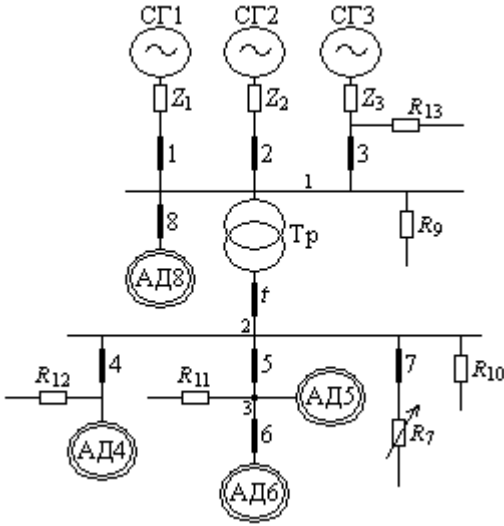


Рис.3. Однолинейная схема распределенной системы электроснабжения

На рис.3 также показаны резисторы $R_9, \dots, R_{13}$ для имитации режимов коротких замыканий в характерных точках системы: на генераторе ГГ3 – резистор R_{13} ; на шине высокого напряжения резистор R_9 ; на шине низкого напряжения резистор R_{10} ; на двигателях АД5, АД6 — резистор R_{11} ; на двигателе АД4 – резистор R_{12} . В штатном режиме все эти резисторы имеют сопротивление 10^6 Ом; для имитации короткого замыкания принимается сопротивление соответствующего резистора 10^{-3} Ом.

Для имитации обрывов генераторов их активные внутренние сопротивления r_s принимаются также 10^6 Ом. Для имитации обрыва трансформатора активные сопротивления обмоток также принимаются 10^6 Ом. Аналогично для имитации выключения двигателей их сопротивления статоров принимаются 10^6 Ом. Скорость вращения генераторов полагаем неизменной, а для имитации рассогласования фаз для ЭДС генераторов $E = -j\omega M_f I_f$ вводятся множители

$e^{j\theta_2(t)}$ и $e^{j\theta_3(t)}$, где $\theta_2(t)$ и $\theta_3(t)$ – углы рассогласования в радианах.

Для определения коэффициентов $A_{11}, A_{12}, \dots, A_{81}, A_{82}, A_{t1}, A_{t1}$ выпишем граничные условия на основных элементах системы и в узловых точках схемы. Уравнения напряжений на первых двух генераторах:

$$\dot{U}_1(0) + \dot{I}_1(0)Z_1 = \dot{E}_1 = -j\omega M_1 I_{f1};$$

$$U_2(0) + I_2(0)Z_2 = \dot{E}_2 = -j\omega M_2 I_{f2} \cdot e^{j\theta_2(t)}. \quad (9)$$

На третьем генераторе учитывается сопротивление R_{13} :

$$\left(I_3(0) + \frac{U_3(0)}{R_{13}} \right) Z_3 + U_3(0) = -j\omega M_3 I_{f3} \cdot e^{j\theta_3(t)}. \quad (10)$$

Уравнения напряжений на шинах высокого напряжения

$$\dot{U}_1(l_1) = \dot{U}_2(l_2) = \dot{U}_3(l_3) = \dot{U}_8(0). \quad (11) - (13)$$

Уравнение токов на шинах высокого напряжения

$$I_1(l_1) + I_2(l_2) + I_3(l_3) = I_8(0) + I_{t1} + \frac{U_8(0)}{R_9}.$$

(14)

Уравнение первичной обмотки трансформатора

$$\dot{U}_8(0) = \underline{Z}_{t1} \dot{I}_{t1} - j\omega M_{12} \dot{I}_{t2}(0), \quad (15)$$

где

$$I_{t1} = I_1(l_1) + I_2(l_2) + I_3(l_3) - I_8(0) - \frac{U_8(0)}{R_9}.$$

Уравнение вторичной обмотки

$$\dot{U}_{t2}(0) + \underline{Z}_{t2} \dot{I}_{t2}(0) - j\omega M_{12} \dot{I}_{t1}. \quad (16)$$

Уравнения напряжений на шинах низкого напряжения

$$\dot{U}_{t2}(l_t) = \dot{U}_4(0) = \dot{U}_7(0). \quad (17) - (18)$$

Уравнение токов на шинах низкого напряжения в точке 2

$$\dot{I}_{t2}(l_t) = \dot{I}_4(0) + \dot{I}_5(0) + \dot{I}_7(0) + \frac{\dot{U}_4(0)}{R_{10}}. \quad (19)$$

Уравнение тока на двигателе АД4

$$I_4(l_4) = \frac{U_4(l_4)}{R_{12}} + \frac{U_4(l_4)}{\underline{Z}_{AD4}(\Omega_4)}. \quad (20)$$

Уравнение тока в точке 3 ответвления шины

низкого напряжения

$$I_5(l_5) = I_6(0) + \frac{\dot{U}_6(0)}{R_{11}} + \frac{\dot{U}_6(0)}{Z_{AD5}(\Omega_5)}. \quad (21)$$

Уравнение напряжения в точке 3 ответвления шины низкого напряжения

$$\dot{U}_5(l_5) = \dot{U}_6(0). \quad (22)$$

Уравнение напряжений на двигателях AD6 и AD8

$$\dot{U}_6(l_6) = \dot{I}_6(l_6)Z_{AD6}(\Omega_6). \quad (23)$$

$$\dot{U}_8(l_8) = \dot{I}_8(l_8)Z_{AD8}(\Omega_8). \quad (24)$$

Уравнение напряжений на статической нагрузке R_7

$$\dot{U}_7(l_7) = \dot{I}_7(l_7)R_7. \quad (25)$$

Конкретная запись граничных условий в характерных точках системы по уравнениям (9) – (25) представлена в Приложении.

Уравнения (9) – (25) представляют систему комплексных уравнений для определения коэффициентов $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{12}, \dots, \underline{A}_{81}, \underline{A}_{82}, \underline{A}_{t1}, \underline{A}_{t2}$. Найдя эти коэффициенты, определяем токи статоров генераторов $\dot{I}_1(0), \dot{I}_2(0), \dot{I}_3(0)$ и токи статоров

и роторов двигателей: $\dot{I}_{ck} = \frac{\dot{U}_k(l_k)}{Z_{ADk}(\Omega_k)}$;

$$\dot{I}_{pk} = -\frac{j(\omega - p_k\Omega_k)L_{adk}}{r_{pk} + j(\omega - p_k\Omega_k)L_{pk}} \dot{I}_{ck};$$

здесь $k = 4, 5, 6, 8$.

Отделяя вещественные и мнимые части токов статоров и роторов двигателей, находим электромагнитные моменты двигателей. Отсюда получаем возможность определения скоростей вращения двигателей решением уравнений (7). Решение выполняется в среде MathCad. На каждом шаге решения из уравнений (9) – (25) определяем комплексные коэффициенты $\underline{A}_{11} \dots \underline{A}_{t2}$, а также токи и напряжения на концах кабелей.

Анализ типичных эксплуатационных режимов системы электроснабжения

Анализ выполнен для системы, блок – схема которой изображена на рис.3. Три синхронных генератора мощностью по 20 кВт с напряжением 660 В имеют внутренние сопротивления $\underline{Z} = 0,02 + 1,1j$ Ом; ток возбуждения $\dot{I}_f = 47$ А.

Понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации $n = 1.73$ мощностью $\underline{S} = 100$ кВА имеет сопротивления обмоток

$$\underline{Z}_{t1} = 0,05 + 31,4j \text{ Ом}; \quad \underline{Z}_{t2} = 0,03 + 10,5j \text{ Ом}.$$

Асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором мощностью по 10 кВт рассчитаны на напряжение 380 В и имеют номинальную скорость 950 об/мин. Сопротивление статора составляет $\underline{Z}_c = 0,267 + 16,01j$ Ом. Моменты инерции с учетом присоединенных нагрузок, кг·м²: $J_4 = 0,35$; $J_5 = 0,15$; $J_6 = 0,3$; $J_8 = 0,6$.

Соединительные кабели имеют волновое сопротивление $\underline{Z}_B = 18,25 + 13,45j$ Ом и коэффициент распространения

$$\gamma = (8,65 + 6,7j) \cdot 10^{-5}.$$

Длины кабелей, м: $L_t = 500$; $L_1 = 526$; $L_2 = 660$; $L_3 = 540$; $L_4 = 560$; $L_5 = 300$; $L_6 = 350$; $L_7 = 560$; $L_8 = 900$.

На рис.4 – 8 представлен переходный процесс одновременного пуска всех четырех двигателей под нагрузками: $M_4 = 0,15\Omega_4$; $M_5 = 0,1\Omega_5$; $M_6 = 0,15\Omega_6$; $M_8 = 0,8\Omega_8$. Из рис.4 следует, что все двигатели успешно разгоняются до номинальной скорости 104 с⁻¹ за две секунды.

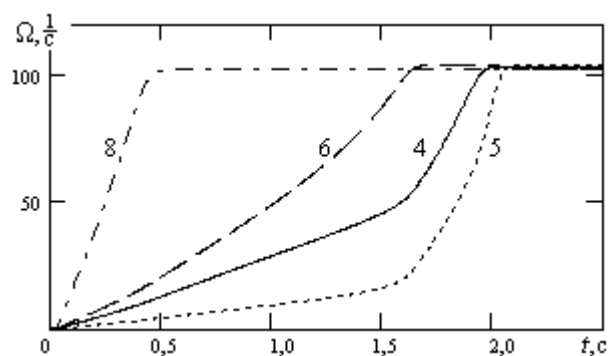


Рис. 4. Одновременный пуск всех двигателей

Сравнительно небольшое время пуска AD8 обусловлено повышенным напряжением на шинах высокого напряжения.

Пусковые токи и напряжения на двигателях показаны на рис.5 и 6.

Пусковые токи низковольтных двигателей превышают номинальные в пять раз. На рис.6 отчетливо заметны провалы напряжения на этих двигателях. Пуск высоковольтного двигателя AD8 сопровождается высокими выбросами тока и напряжения, что отчасти объясняется возникшим резонансом напряжений на этом участке системы.

Активные мощности электрических машин

изображены на рис.6 и 7. Помимо двигателей часть мощности генераторов потребляется в кабелях и в трансформаторе. Сравнительно меньшая мощность, отдаваемая в систему вторым генератором, объясняется большей длиной кабеля L_2 . Далее обсуждаются результаты моделирования некоторых типичных рабочих и аварийных режимов системы.

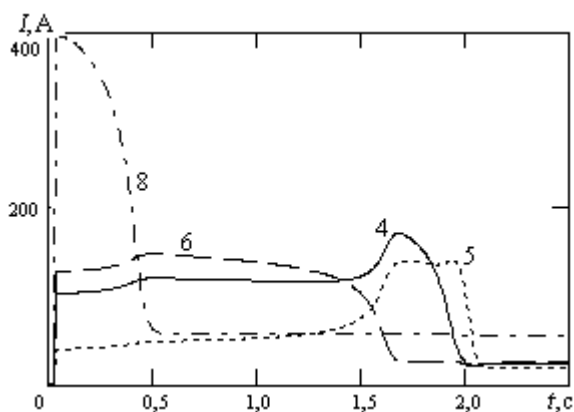


Рис. 5. Пусковые токи двигателей

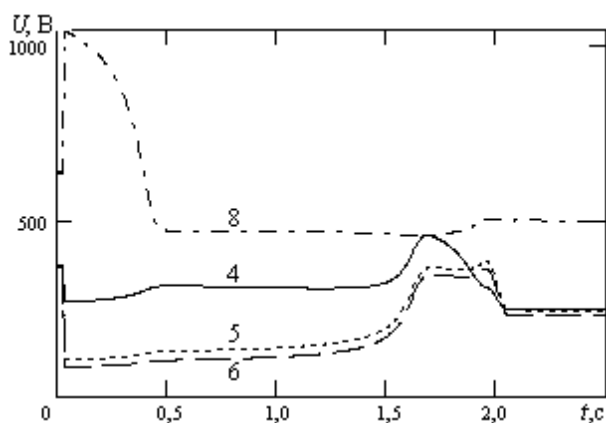


Рис. 6. Напряжения на пускаемых двигателях

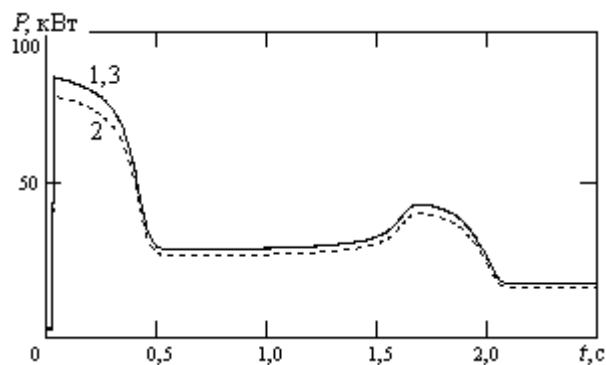


Рис. 6. Активные мощности генераторов в процессе пуска

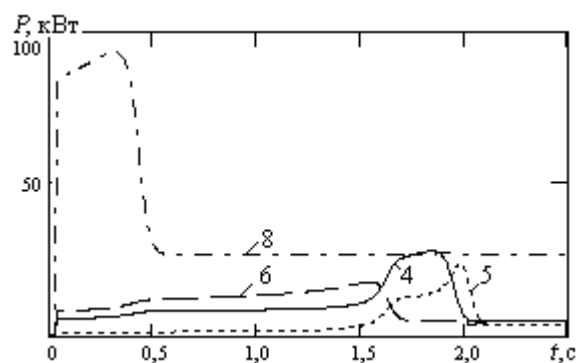


Рис. 7. Активные мощности на пускаемых двигателях

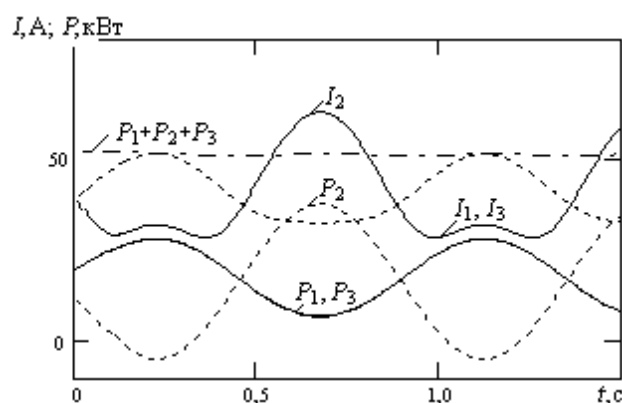


Рис. 8. Активные мощности на генераторах при нарушении синхронизации генератора

На рис.8 представлены результаты расчета стационарного режима системы при потере синхронизации второго генератора, что имитируется множителем $e^{j\theta_2(t)} = e^{j-0,2\sin 5t}$. Рисунок показывает, что разсинхронизация даже одного генератора сопровождается значительными колебаниями токов мощностей всех генераторов, хотя общая активная отдаваемая мощность и напряжение на сборных шинах системы сохраняются неизменными.

Такие часто встречающиеся случаи, как отключения или обрывы элементов системы показаны на рис.9 и 10.

Из рисунков следует, что при потере питания вследствие отключения или обрыва скорости двигателей снижаются в соответствии с моментами сопротивления их нагрузок и моментами инерции. Легкий двигатель AD5 тормозится быстрее всех.

Далее показаны процессы при увеличении нагрузки системы.

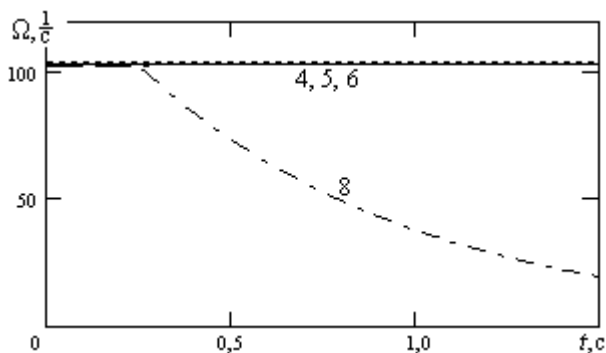


Рис. 9. Отключение двигателя AD8

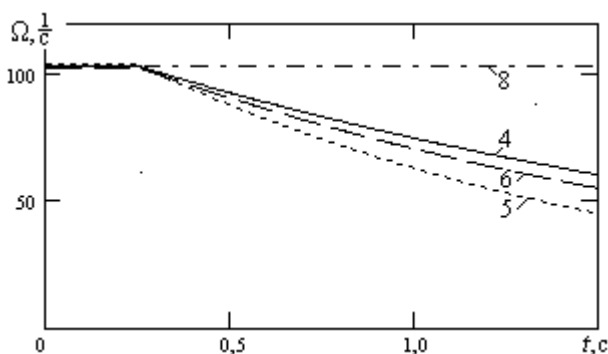
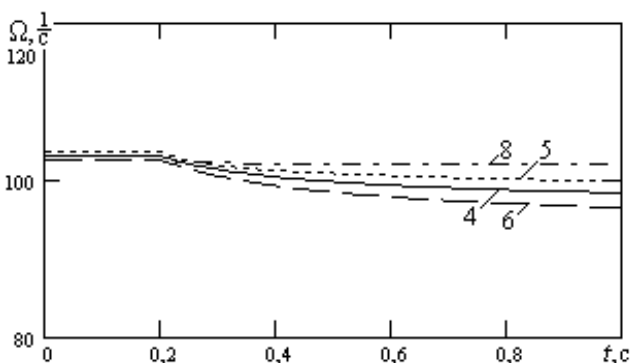


Рис. 10. Обрыв первичной обмотки трансформатора

Рис. 11. Подключение статической нагрузки R_7

На рис.11 приведен расчет наброса нагрузки при подключении в момент 0,2 с статической нагрузки $R_7 = 1 \text{ Ом}$. Из рисунка следует, что подключаемая нагрузка является чрезмерной, так как двигатели на шинах низкого напряжения теряют скорость вследствие снижения напряжения на шинах.

Результаты пуска в момент $t = 0,3 \text{ с}$ двигателя на систему с тремя уже работающими двигателями проиллюстрированы на рис.12. Пуск сопровождается снижением напряжения на ши-

нах низкого напряжения и потерей скорости двигателей AD5 и AD6. По мере разгона пускаемого двигателя AD6 восстанавливает режим, а легкий двигатель AD5 выпадает из синхронизма.

Тяжелый аварийный режим короткого замыкания показан на рис.13 и 14.

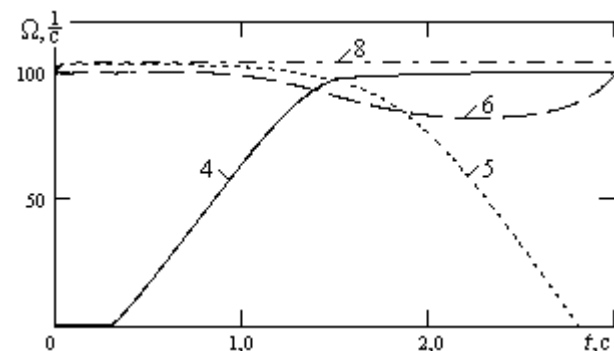


Рис. 12. Пуск двигателя AD4 при трех работающих двигателях

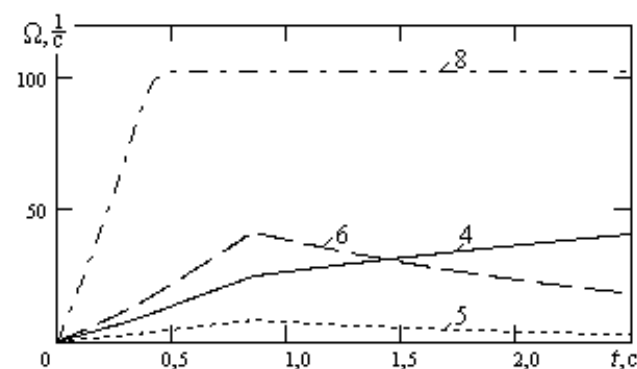


Рис. 13. Короткое замыкание двигателя AD5 при одновременном пуске двигателей

При одновременном пуске всех двигателей в момент $t = 0,85 \text{ с}$ произошло короткое замыкание двигателя AD5. Это имитировалось снижением сопротивления R_{11} до величины 10-3 Ом. Разгон двигателей AD5 и AD6 прервался, а разгон двигателя AD4 только замедлился в силу его «электрической» удаленности от точки аварии.

На рис.14 показаны графики токов при аварии. Токи двигателей AD5 и AD6 упали до нуля. Ток двигателя AD4 упал с пускового уровня вдвое, а ток кабеля 5 вдвое увеличился до 190 А.

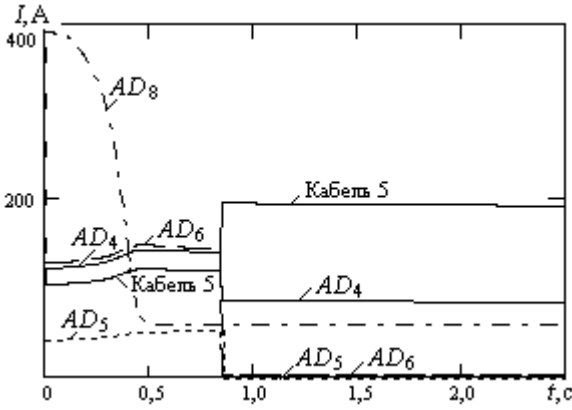


Рис. 14. Короткое замыкание двигателя AD5 при одновременном пуске двигателей

Авария не повлияла на режим двигателя AD8, так как он подсоединен к безаварийным шинам высокого напряжения.

Аналогично можно исследовать и другие штатные и аварийные режимы системы распределенного электропривода.

Заключение

В статье показано, что существует принципиальная возможность исследования режимов работы группы асинхронных двигателей, находящихся в реальной сети электроснабжения с учетом влияния кабельных линий с распределенными параметрами. Учет распределенных параметров кабельных линий позволяет выполнять расчет режима с более высокой точностью, чем обычно применяемые методики.

Применение подобного подхода к расчетной практике позволяет разрабатывать программное обеспечение, что дает возможность задавать конфигурацию системы электроснабжения, длины и параметры ветвей кабелей, количество двигателей, трансформаторов и генераторов и их параметры, последовательности включения двигателей для расчета реальных процессов пусков и отключений приводов погрузочно – разгрузочных комплексов, характер нагрузки на двигателях при моделировании режимов работы портовых и судовых механизмов.

Перспективной представляется задача построения алгоритмов оптимального управления подобными системами на основе полупроводниковых преобразователей частоты.

Приложение

Синхронные генераторы по (9) – (10)

$$\begin{aligned} \underline{A}_{11} + \underline{A}_{12} + \underline{Z}_1 \cdot \frac{\underline{A}_{11} - \underline{A}_{12}}{\underline{Z}_{B1}} &= -j\omega M_{f1} I_{f1}; \\ \underline{A}_{21} + \underline{A}_{22} + \underline{Z}_2 \cdot \frac{\underline{A}_{21} - \underline{A}_{22}}{\underline{Z}_{B2}} &= \\ &= -j\omega M_{f2} I_{f2} \cdot e^{j02(t)}; \\ \underline{A}_{31} + \underline{A}_{32} + \underline{Z}_3 \cdot \frac{\underline{A}_{31} - \underline{A}_{32}}{\underline{Z}_{B3}} + \\ + \underline{Z}_3 \cdot \frac{\underline{A}_{31} + \underline{A}_{32}}{R_{13}} &= -j\omega M_{f3} I_{f3} \cdot e^{j03(t)}. \end{aligned}$$

Напряжения и токи на шинах высокого напряжения по (11) – (14)

$$\begin{aligned} \underline{A}_{11} e^{-\gamma_1 l_1} + \underline{A}_{12} e^{\gamma_1 l_1} &= \underline{A}_{21} e^{-\gamma_2 l_2} + \underline{A}_{22} e^{\gamma_2 l_2}; \\ \underline{A}_{31} e^{-\gamma_3 l_3} + \underline{A}_{32} e^{\gamma_3 l_3} &= \underline{A}_{21} e^{-\gamma_2 l_2} + \underline{A}_{22} e^{\gamma_2 l_2}; \\ \underline{A}_{31} e^{-\gamma_3 l_3} + \underline{A}_{32} e^{\gamma_3 l_3} &= \underline{A}_{81} + \underline{A}_{82}; \\ \frac{\underline{A}_{11} e^{-\gamma_1 l_1} - \underline{A}_{12} e^{\gamma_1 l_1}}{\underline{Z}_{B1}} + \frac{\underline{A}_{21} e^{-\gamma_2 l_2} - \underline{A}_{22} e^{\gamma_2 l_2}}{\underline{Z}_{B2}} + \\ + \frac{\underline{A}_{31} e^{-\gamma_3 l_3} - \underline{A}_{32} e^{\gamma_3 l_3}}{\underline{Z}_{B2}} &= \frac{\underline{A}_{81} - \underline{A}_{82}}{\underline{Z}_{B8}} + \\ + \underline{I}_{t1} + \frac{\underline{A}_{81} + \underline{A}_{82}}{R_9}. \end{aligned}$$

Уравнения первичной и вторичной обмоток трансформатора по (15) – (16)

$$\underline{A}_{81} + \underline{A}_{82} = \underline{Z}_{t1} \underline{I}_{t1} - j\omega M_{12} \frac{\underline{A}_{t1} - \underline{A}_{t2}}{\underline{Z}_{Bt}},$$

где $\underline{I}_{t1}$ получаем из (14);

$$\underline{A}_{t1} + \underline{A}_{t2} + \underline{Z}_{t2} \frac{\underline{A}_{t1} - \underline{A}_{t2}}{\underline{Z}_{Bt}} - j\omega M_{12} \underline{I}_{t1} = 0.$$

Уравнения напряжений и токов на шинах низкого напряжения по (17) – (19)

$$\begin{aligned} \underline{A}_{t1} e^{-\gamma_t l_t} + \underline{A}_{t2} e^{\gamma_t l_t} &= \underline{A}_{41} + \underline{A}_{42}; \\ \underline{A}_{71} + \underline{A}_{72} &= \underline{A}_{41} + \underline{A}_{42}; \\ \frac{\underline{A}_{t1} e^{-\gamma_t l_t} - \underline{A}_{t2} e^{\gamma_t l_t}}{\underline{Z}_{Bt}} &= \frac{\underline{A}_{41} - \underline{A}_{42}}{\underline{Z}_{B4}} + \\ + \frac{\underline{A}_{51} - \underline{A}_{52}}{\underline{Z}_{B5}} &= \frac{\underline{A}_{71} - \underline{A}_{72}}{\underline{Z}_{B7}} + \frac{\underline{A}_{41} + \underline{A}_{42}}{R_{10}}. \end{aligned}$$

Уравнение тока на двигателе AD4 по (20)

$$\frac{A_{41}e^{-\gamma_4 l_4} - A_{42}e^{\gamma_4 l_4}}{Z_{B4}} = \frac{A_{41}e^{-\gamma_4 l_4} + A_{42}e^{\gamma_4 l_4}}{R_{12}} +$$

$$+ \frac{A_{41}e^{-\gamma_4 l_4} + A_{42}e^{\gamma_4 l_4}}{Z_{AD4}(\Omega_4)}.$$

Уравнения напряжения и тока в точке 3 шины низкого напряжения по (21) – (22)

$$\frac{A_{51}e^{-\gamma_5 l_5} - A_{52}e^{\gamma_5 l_5}}{Z_{B5}} = \frac{A_{61} - A_{62}}{Z_{B6}} +$$

$$+ \frac{A_{61} + A_{62}}{R_{11}} + \frac{A_{61} + A_{62}}{Z_{AD5}(\Omega_5)};$$

$$A_{51}e^{-\gamma_5 l_5} + A_{52}e^{\gamma_5 l_5} = A_{61} + A_{62}.$$

Уравнения напряжений на двигателях AD6, AD8 и статической нагрузке R_7 по (23) – (25)

$$\frac{A_{61}e^{-\gamma_6 l_6} - A_{62}e^{\gamma_6 l_6}}{Z_{B6}} Z_{AD6}(\Omega_6) = A_{61}e^{-\gamma_6 l_6} + A_{62}e^{\gamma_6 l_6};$$

$$\frac{A_{81}e^{-\gamma_8 l_8} - A_{82}e^{\gamma_8 l_8}}{Z_{B8}} Z_{AD8}(\Omega_8) = A_{81}e^{-\gamma_8 l_8} + A_{82}e^{\gamma_8 l_8};$$

$$\frac{A_{71}e^{-\gamma_7 l_7} - A_{72}e^{\gamma_7 l_7}}{Z_{B7}} R_7 = A_{71}e^{-\gamma_7 l_7} + A_{72}e^{\gamma_7 l_7}.$$

Список литературы

1. Ещин Е.К. Модель асинхронного электродвигателя в системе электроснабжения / Е.К.Ещин // Электротехника, 2002. – № 1. – С.40 – 43.
2. Ещин.Е.К. Управление состоянием группы асинхронных электродвигателей в сети электроснабжения // Изв.ВУЗов. Электромеханика. – 2020. – Т.63. – № 1. – С.62 – 68. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2020 – 1 – 62 – 68.
3. Справочник судового электротехника. Т.1. Судовые электроэнергетические системы и устройства / Под ред. Г.И.Китаенко. – Л.: Судостроение, 1980. – 528 с.
4. Усикхин В.Н. О влиянии нагрузки на токи в электроустановках переменного тока до 1 кВ // Промышленная энергетика. – 2001. – № 1. – С.29 – 33.
5. Бабокин Г.И., Шпрехер Д.М., Колесников Е.Б., Овсянников Д.С. Исследование частотного двухдвигательного пуска электропривода скребкового конвейера методом математического моделирования // Изв.ВУЗов. Электромеханика. – 2022. – Т.65. – № 1. – С.49 – 55. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2022 – 1 – 49 – 55.
6. Канов Л.Н. Оптимизация процесса пуска распределенного асинхронного электропривода / Научный журнал «Энергетические установки и тех-

нологии». 2021. Т.7. № 4. Изд. ФГАОУ ВО «Се-вастопольский государственный университет». С.23 – 29. ISSN 2413 – 5526.

7. Комков А.Н., Чернев М.Ю., Блюк В.В. Исследование взаимного влияния асинхронных электроприводов центробежных насосов в составе электротехнической системы // Известия ВУЗов. Электромеханика. 2019. Т.62. № 5. С.62 – 67. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2019 – 5 – 62 – 67.
8. Бурмакин О.А. Моделирование судовой электростанции со встроенной сетью постоянного тока в среде MATLAB / О.А.Бурмакин, В.В.Гуляев, Ю.С.Малышев, С.В.Попов. – Интеллектуальная электротехника. 2021. № 3. С. 75-84. DOI: 10.46960/2658-6754_2021 – 3 – 75.
9. Герман Л.А. Уточненный метод расчета токов короткого замыкания в тяговой сети переменного тока / Л.А.Герман, И.П.Карпов // – Интеллектуальная электротехника. 2021. № 2. С. 15-25. DOI: 10.46960/2658-6754_2021 – 2 – 15.
10. Страхов С.В. Переходные процессы в электрических цепях, содержащих машины переменного тока. М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1960. 247 с.
11. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М: Изд-во «Юрайт», 2012. 701 с.
12. Электрические системы. Электрические сети / В.А.Веников, А.А.Глазунов, Л.А.Жуков и др. М.: Изд-во «Высшая школа», 1998. 511 с.
13. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: изд-во «Высшая школа», 2001. – 431 с.
14. Ковач К., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М., Л.: изд-во «Высшая школа», 2001. – 528 с.

References

1. Eshchin E.K. Model asinchronnogo elektrodvigatelya v ssisteme elektrosnabzheniya [A Model of Asynchronous electric motor is in the System of Electrosupply]. Electrotechnique/. – 2002. No.1. – PP.40-43.
2. Eshchin E.K. Upravlenie sostoyaniem gruppy asinkhronnykh elektrodvigateli v seti elektrosnabzheniyz [A Control the State of Group of Asynchronous electric motors is in the Network of Electrosupply]. News of higher educational establishments. Electromechanics/. – 2020. Vol. 63, No.1.– PP.62-68. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2020 – 1 – 62 – 68.
3. Kitaenko G.I. Spravochnik sudovogo elektrotekhnika.T.1.Sudovye elektroenergeticheskie sistemy I ustroistva [Reference book of ship electrical engineer. T.1. Ship electroenergy systems and devices]. Leningrad: Izd. «Shipbuilding», 1980. – 528 p.
4. Usikhin V.N. O vliyanii nagruzki na toki v elektroustanovkakh peremennogo toka do 1 kV

- [About Influence of Loading on Currents in Electroplants of Alternating current to 1 kV]. Industrial Energetic/. – 2001. – No.1. – PP.29 – 33.
5. Babokin G.I., Shprekher D.M., Kolesnikov E.B., Ovsyannikov D.S. *Issledovanie chastotnogo dvukh dvigatel' nogo pushka elektroprivoda skrebkovogo konveera metodom matematicheskogo modelirovaniya* [Research of the frequency twomotors starting of electromechanic of scraper conveyer by the method of mathematical design]. News of higher educational establishments. Electromechanics/. – 2022. Vol. 65, No.1.– PP.49-55. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2022 – 1 – 49 – 55.
 6. Kanov L.N. *Optimizatsiya protsessa pushka raspredelenogo asinkhronnogo elektroprivoda* [Optimization of Process of Starting of the up-diffused Asynchronous electromechanic]. A scientific magazine is the «Power plants and technologies». 2021. T.7. No. 4. Publ. of FGAOU In the «Sevastopol state university». P.23 – 29. ISSN 2413 – 5526.
 7. Komkov A.N., Chernov M.U., Bluk V.V. *Issledovanie vzaimnogo vliyaniya asinkhronnykh elektroprivodov tsebrobeznykh nasosov v sostave elektrotekhnicheskoi sistemy* [Research of cross-coupling of asynchronous electromechanics of Chempumps in Composition the Electrical engineering system]. News of higher educational establishments. Electromechanics/. – 2019. Vol. 62, No.5.– PP.62-67. DOI: 10.17213/0136 – 3360 – 2029 – 5 – 62 – 67.
 8. Burmakina O.F., Gulyaev V.V., Malyshev Y.U., Popov S.V. *Modelirovanie sudovoi elektrostantsii so vstroennoi set'yu postoyannogo toka v srede MATLAB* [Design of ship power-station with the built-in network of direct-current in the environment of MATLAB]. Intellectual electrical engineering. – 2021. No. 1. PP. 75-84. DOI: 10.46960/2658-6754_2021 – 3 – 75.
 9. German L.A., Karpov I.P. *Utochnenniy metod rascheta tokov korotkogo замыkaniya v tyagovoi seti peremennogo toka* [The specified method of calculation of currents of short circuit is in the hauling network of alternating current]. Intellectual electrical engineering. – 2021. No. 2. PP. 15-25. DOI: 10.46960/2658-6754_2021 – 2 – 15.
 10. Strakhov S.V. *Perekhodnye protsessy v elektricheskikh tsepyakh, soderzhashchikh mashiny peremennogo toka* [Transients are in Electric chains, Containing the machines of Alternating current]. M., L.: the State power publishing house, 1960. 247 p.
 11. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical bases of the Electrical Engineering. Electric chains]. M.: Izd-vo of «Yurayt», 2012. 701 p.
 12. Venikov V.A., Glazunov A.A., Zhukov L.A. *Elektricheskie sistemy. Elektricheskie seti*. M.: Izd-vo is «Higher school», 1998. 511 p.
 13. Kopylov I.P. *Matematicheskoe modelirovanie elektricheskikh mashin* [Mathematical Modeling of Electric machines]. Moscow: Izd. «Higher school», 2001. – 431 p.
 14. Kovach K., Rats I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transients are in the Machines of Alternating current]. Moscow, Leningrad: Izd. «Higher school», 2001. – 528 p.

УДК 62-573

Устранение влияния устройств плавного пуска асинхронных двигателей на спектральный состав напряжения питающей сети

Е.Г. Малюк

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, egmalyuk@mail.sevsu.ru.

Статья поступила 25.05.2023 г.; после доработки 26.05.2023 г.

Аннотация

В статье рассматривается вопрос устранения искажений питающего напряжения при применении устройств плавного пуска на основе тиристорных преобразователей, путем применения резонансных фильтров. Изложена методика расчета фильтров и их архитектура. Рассматривается эффективность применения ФКУ в системах плавного пуска асинхронных двигателей.

Ключевые слова: Асинхронный двигатель, устройство плавного пуска, тиристорный преобразователь напряжения, резонансный фильтр, фильтрокомпенсирующее устройство.

Elimination of the influence of asynchronous motor soft starters on the spectral composition of the supply voltage of the network

E.G. Malyuk

² Sevastopol State University, st. Universitetskaya 33, 299053, Sevastopol, Russia,
egmalyuk@mail.sevsu.ru.

Received 25.05.2023 y.; received in final form 26.05.2023 y.

Annotaition

The article deals with the issue of eliminating distortions of the supply voltage when using soft start devices based on thyristor converters, through the use of resonance filters. The methodology for calculating filters and their architecture is described. The effectiveness of the use of PKU in soft start systems of asynchronous motors is considered.

Keywords: Asynchronous motor, soft starter, thyristor voltage converter, resonant filter, filter compensating device.

Введение

На сегодняшний день для пуска асинхронных двигателей (АД) достаточно широко применяют устройства плавного пуска (УПП) на основе тиристорного преобразователя напряжения (ТПН).

Необходимость использования УПП диктуется необходимостью снижения пусковых токов двигателя и устранение тем самым недопустимых провалов напряжения сети для нормальной работы других потребителей и особенно потре-

бителей, чувствительным к провалам напряжения питания.

Наиболее частым в практике электропривода типовым решением указанной проблемы является пуск с отсечкой по току [1]. Реализация данного решения показана на рис. 1.

Суть этого решения заключается в ограничении пускового тока АД на расчётном уровне $I_{уст}$ (так называемой уставки), который определяется по падению напряжения ΔU на сопротивлении сети Z_c от протекания этого тока, при этом ΔU должно соответствовать требованиям дей-

Несинусоидальность токов и напряжения приводит к следующим отрицательным последствиям: увеличиваются потери мощности, снижается срок службы изоляции оборудования и диэлектриков конденсаторов, нарушается нормальная работа чувствительных электроприемников, защиты, автоматики и связи, а также в цепях возможно появление резонансных эффектов. Экономически это выражается в увеличении капитальных затрат и технологических потерях от остановки оборудования. В связи с все большим распространением регулируемых приводов и других нелинейных нагрузок проблема гармоник в распределительных сетях стоит достаточно остро.

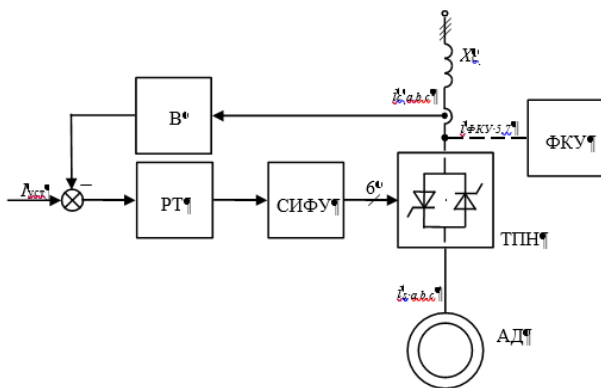


Рис. 1. Структурная схема асинхронного электропривода с устройством плавного пуска

Второй участок наступает при достижении током значения «уставки». Этот участок, как правило, наиболее продолжительный по вре-

мени, на нем при относительно медленном изменении скорости двигателя режим работы ТПН можно считать установившимся, и состав тока с учётом гармонических составляющих достаточно точно описывается рядом.

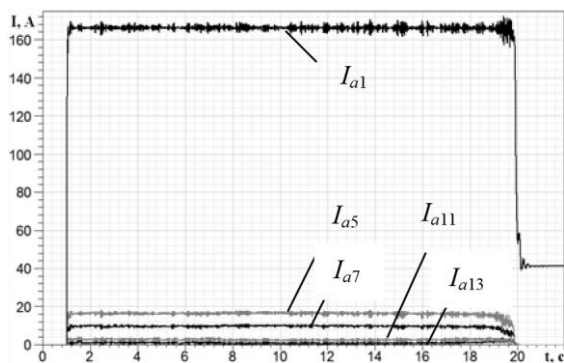


Рис.2. Амплитуды гармонических составляющих тока в системе ТПН-АД при пуске «под отсечку»

$$i(t) = I_0 + \sum_{v=1}^n I_{vm} \sin(v\omega t + \psi_v)$$

где I_0 – постоянная составляющая, равная нулю;

$I_{vm} \sin(v\omega t + \psi_v)$ – гармоники или гармонические составляющие v -го порядка с амплитудой I_{vm} и начальной фазой ψ_v ;

ω – круговая частота первой гармоники;

n – порядок (номер) последней из учитываемых высших гармоник. [2]

Полученные гармоники достаточно условно разделяют на канонические и не канонические. Каноническими считают гармоники, которые генерирует идеальный преобразователь, если не учитывать реально существующую асимметрию параметров цепи между фазами. ТПН генерирует канонические гармоники тока следующих порядков:

$$v = pk \pm 1,$$

где $k=0,1,2,3... n$, p – число коммутаций в преобразователе за период сети, для рассматриваемой схемы ТПН с двумя включенными встречнопараллельными тиристорами в каждой фазе $p=6$, таким образом, номера гармоник в данном случае – нечетные и не кратные трем.

Амплитуды отдельных канонических гармоник зависят от параметров цепи и значения уровня уставки [3]. Коэффициент несинусоидальности возрастает при уменьшении $I_{уст}$ и в случае малой мощности питающей сети. Отдельные гармоники могут иметь экстремум при определенных уставках. Как видно из рис.2, наиболь-

шие амплитуды имеют пятая и седьмая гармоника тока.

По завершению пуска АД, преобразователь входит в режим ограничения по напряжению при полностью открытых тиристорах и не вносит искажений в форму тока.

Генерируемые преобразователем гармонические составляющие тока, вызывают падения напряжения на сопротивлениях сети и приводят к несинусоидальности напряжения питающей сети. Показателями качества электроэнергии в соответствии с существующим стандартом, относящимся к гармоническим составляющим напряжения, по [4] являются:

- значения коэффициентов отдельных гармонических составляющих;
- значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения.

На рис. 3 приведены графики этих показателей в процессе пуска «под отсечку» в системе ТПН-АД. Рассматривались гармоники по тринадцатую включительно. Суммарный коэффициент гармонических составляющих считался только по этим гармоникам

$$K_0 = \frac{\sqrt{U_5^2 + U_7^2 + U_{11}^2 + U_{13}^2}}{U_1}$$

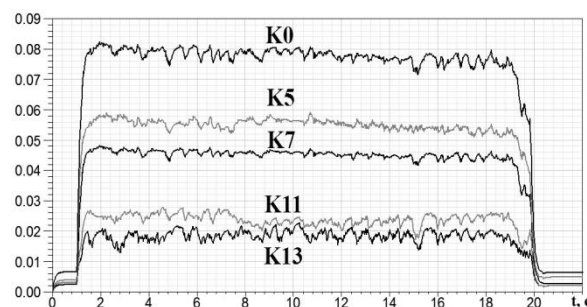


Рис.3. Значения отдельных (K_v) и суммарного коэффициентов (K_0) гармонических составляющих напряжения при пуске без ФКУ.

Количественные значения коэффициентов гармонических составляющих и предельно допустимые значения этих показателей для сетей 10 кВ по [4]. приведены в табл.1.

Таблица 1 Значение предельных фактических коэффициентов гармонических составляющих

	K_5 , %	K_7 , %	K_{11} , %	K_{13} , %	K_0 , %
ГОСТ	6	4,5	3	3	8
Фактически	5,6	4,6	2,4	2	8

Из таблицы видно, что седьмая гармоника превышает допустимые пределы, так же на границе находится суммарный коэффициент гармонических составляющих, а с учетом неучтенных гармоник он, вероятно, превысит предельное значение.

Расчета фильтрокомпенсирующего устройства

Подавление высших гармоник в электрических системах и сетях часто осуществляется с помощью силовых резонансных фильтров, подключаемых параллельно источнику гармоник. Эти фильтры образуют путь с минимальным сопротивлением для протекания токов определенной частоты, тем самым ограничивая их распространение в систему электроснабжения. Обычно одновременно подключают несколько узкополосных фильтров, настроенных на частоты наиболее сильных канонических гармоник тока преобразователя.

Схема фильтра в однофазном исполнении, расчетная схема и зависимость его полного сопротивления от частоты показана на рис. 4.

Минимальное сопротивление наблюдается при угловой частоте настройки фильтра равной:

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_\phi C_\phi}}$$

оно равно эквивалентному активному сопротивлению фильтра. На высоких частотах сопротивление рассматриваемой цепи будет иметь индуктивный характер, а до ω_p – емкостной, отсюда следует, что на частоте основной (промышленной) гармоники фильтр генерирует реактивную мощность, поэтому один или несколько параллельно подключенных к сети фильтров представляют собой фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ), которое способно не только подавлять высшие гармоники генерируемые преобразователем, но и компенсировать недостаток реактивной мощности в точке подключения.

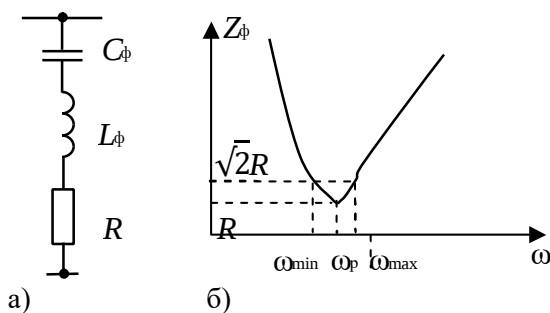


Рис. 4. Узкополосный фильтр

а) схема фильтра, б) частотная характеристика

Одним из основных параметров фильтра является его добротность, которая определяется как отношение индуктивного (или емкостного) сопротивления X_p на частоте настройки к активному:

$$d = \frac{X_p}{R}$$

В общем случае добротность определяет скорость затухания свободных составляющих в переходных процессах, происходящих в фильтре, а также полосу пропускания фильтра.

$$\omega_{max} - \omega_{min} = \frac{\omega_p}{d}$$

При этом частота пропускания условно ограничивается частотами, при которых

$$Z_\phi = \sqrt{2}R$$

Эти частоты носят название частот расстройки фильтра.

При точной настройки фильтра на необходимую гармонику для повышения эффективности подавляющих свойств фильтра и снижения потерь, добротность должна иметь как можно большее значение. Однако ввиду отклонения основной частоты, вызванной изменением параметров конденсатора и катушки индуктивности в процессе эксплуатации (старение и тепловые отклонения), а так же из-за существующих допусков при изготовлении и дискретности настройки элементов возможна некоторая «расстройка» фильтра на величину δ . Качество фильтрации при этом ухудшается и для того, чтобы компенсировать эти отклонения, добротность фильтров приходится снижать. Практические значения добротности подобных узкополосных фильтров обычно лежит в диапазоне от 30 до 60 [5].

Расчет и проектирование ФКУ можно разделить на следующие этапы:

1. Выбирают число фильтров и их конфигурацию для комплекта ФКУ.
2. Определяют суммарную реактивную мощности ФКУ и распределяют ее между фильтрами.
3. Рассчитывают параметры комплектующих элементов ФКУ - конденсаторов, реакторов, резисторов. [5].

Выбор схемы ФКУ делается на основе гармонического анализа формы кривых тока и напряжения. Критерием правильности выбора типов и числа фильтров ФКУ является выполнение нормативных требований по форме кривых напряжения в точке присоединения преобразователя к сети. Как было рассмотрено выше, наиболее сильными каноническими гармониками

ками при тиристорном преобразовании напряжения являются 5-я и 7-я, поэтому предварительно рекомендуется устанавливать узкополосные фильтры с этими частотами настройки. При необходимости после гармонического анализа реального фильтра дополнительно устанавливают широкополосный фильтр.

Реактивная мощность, генерируемая ФКУ на частоте первой гармонике, определяется исходя из оценки ее баланса в точке подключения ФКУ. Исходя из баланса реактивной мощности, выбирается суммарную емкость конденсаторных батарей. Возможны два варианта [6]:

1. ФКУ не рассматривается как источник реактивной энергии и выполняет только роль фильтра. При этом емкость конденсаторов выбирается исходя из условия обеспечения минимума их установленной мощности $Q_{уст}$ и соответственно стоимости.
2. Параметры конденсаторной батареи выбираются исходя из необходимого объема генерации заданной реактивной мощности по первой гармонике $Q_{1ФКУ}$.

Второй подход может дать наибольшую экономическую выгоду при использовании с мощными двигателями, особенно работающими в длительном режиме с постоянной скоростью, например. Если в первом случае ФКУ отключается, после выхода двигателя на режим, во втором случае ФКУ после пуска АД не отключается, хотя параметры его могут меняться и выдает реактивную мощность, количественное значение которой находится исходя из анализа ее баланса в точке подключения. При этом необходимо обеспечивать такую степень компенсации реактивной мощности, чтобы значение отклонения напряжения в общей точке преобразователя и сети не выходило за нормальные пределы. Без учета других потребителей можно принять $Q_{1ФКУ}$ равной реактивной мощности двигателя потребляемой в номинальном (рабочем) режиме. Это решение позволяет уменьшить гармонические искажения от системы ТПН-АД в пусковых режимах, повысить коэффициент мощности в точке подключения в рабочем режиме, разгрузить питающие кабели и снизить падение напряжение.

После выбора $Q_{ФКУ1}$, генерируемой всем ФКУ, важной задачей является ее распределение между отдельными фильтрами, от этого будет зависеть соотношение установленной мощности конденсаторов и реакторов. Рациональное распределение в общем случае является оптимизационной задачей, критериями оптимальности в зависимости от условий применения могут быть

масса, стоимость ФКУ или потери в ФКУ. В [5] приводится постановка и алгоритм решения указанной задачи.

В первом приближении достаточно воспользоваться рекомендациями, приведенными в [7] и распределить требуемую реактивную мощность между фильтрами пропорционально токам I_v , тем самым поддерживается относительная величина тока гармоник I_v/I_1 на одном уровне для всех конденсаторов, что обеспечивает наилучшее их использование.

Зная реактивную мощность, генерируемую v -м фильтром на основной частоте, емкость и индуктивность фильтра однозначно определяются по формулам:

$$C_{\Phi v} = \frac{(v^2 - 1)Q_{\Phi v}}{v^2 \omega_c U^2}$$

$$L_{\Phi v} = \frac{1}{C_{\Phi v} \omega_v^2}$$

где ω_c - угловая частота основной гармоники сети;

ω_v - угловая частота настройки фильтра;

U - действующее значение номинального

(линейного) напряжения сети.

Полагая, что по фильтру v -ой гармоники протекает только ток первой и резонансной гармоники расчетная установленная мощность конденсаторной батареи v -го фильтра ФКУ определяется по формуле:

$$Q_{устv} = Q_{1v} + Q_v = \frac{v^2}{v^2 - 1} U^2 C_{\Phi v} \omega_c + \frac{3I_v^2}{v C_{\Phi v} \omega_c}$$

Эта мощность всегда больше генерируемой.

Пуск асинхронного двигателя в системе тиристорного преобразования напряжения с фильтрокомпенсирующим устройством

В данном разделе приводятся результаты моделирования пуска в системе ТПН-АД с применением ФКУ. Для снижения уровня гармоник применяются два трехфазных резонансных фильтра, выполненных по схеме, показанной на рис. 4, и настроенных на пятую и седьмую гармоники. Исследуемый двигатель при номинальной нагрузке и номинальном напряжении потребляет из сети реактивную мощность $Q_{дН} = 223$ кВар, распределение этой мощности по фильтрам осуществляется пропорционально току пятой и седьмой гармоник.

Параметры фильтра, рассчитанные в соот-

ветствии с формулами, указанными выше, приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры ФКУ

ν	$Q_{IV},$ кВа р	$C_{фв},$ мкФ	$L_{фв},$ мГн	d_{ν}	$R_{фв},$ Ом	$Q_{уств},$ кВа р
5	137	4,19	96,8	50	3,04	195
7	86	2,68	77,1	50	3,4	111,5

На рис. 5 приведены значения коэффициентов гармонических составляющих в процессе пуска в системе ТПН-АД после установки фильтрокомпенсирующего устройства. В соответствии с полученными кривыми (см. рис.5), очевидно, что использование фильтрокомпенсирующего устройства позволило добиться существенного улучшения гармонического состава. Суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения уменьшился в 2,4 раза, Коэффициенты пятой и седьмой гармоник снизились в 2,7 и 3,8 раза соответственно, кроме того уменьшились коэффициенты более высоких: одиннадцатой и тринадцатой гармонических составляющих – в 1,5 и 1,4 раза соответственно. В результате все показатели удовлетворяют ГОСТ [4].

Важно отметить, что как в случае отсутствия ФКУ, так и с ним система управления УПП поддерживает один и тот же ток сети, обеспечивающий заданную просадку напряжения. При этом при наличии ФКУ при пуске, ток двигателя будет больше тока сети, поскольку часть реактивной энергии генерируется конденсаторами фильтров. Большой ток двигателя облегчает условия его пуска. При данных параметрах время разгона до рабочей скорости сократилось почти вдвое, соответственно существенно уменьшается нагрев двигателя, а как известно длительное пребывание в области больших скольжений и повышенное тепловыделение является одним из недостатков пуска АД с помощью ТПН

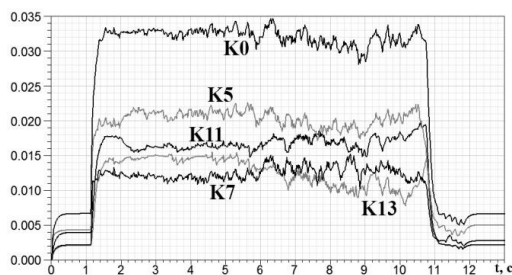


Рис.5. Значения отдельных (K_v) и суммарного коэффициентов (K_0) гармонических составляющих напряжения при пуске с ФКУ.

Заключение

1. При пуске асинхронных двигателей с УПП происходит искажение напряжения питающей сети. Уровень этого искажения может превышать предельно допустимый в конкретных условиях работы.

2. Применение ФКУ позволяет не только уменьшить негативное влияние высших гармоник, но и обеспечить генерацию реактивной мощности в точке подключения УПП, что в свою очередь облегчает решение основной задачи пуска АД с приемлемым уровнем остаточного напряжения при допустимом нагреве.

3. Подтверждена возможность использования общепринятых рекомендаций по выбору параметров ФКУ для систем ТПН-АД.

Список литературы

1. Маренич, К.Н. Асинхронный электропривод горных машин с тиристорными коммутаторами: монография/К.Н. Маренич.-Москва; Вологда:Инфра-Инженерия, 2022.- 132с.:ил.,табл.
2. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. - 4-е изд., перераб. и доп. - М: Энергоатомиздат. 2000. - 331 с, ил.
3. Зюзев А.М., Применение ФКУ для улучшения электромагнитной совместимости с сетью устройств плавного пуска асинхронных двигателей / А.М. Зюзев, М.В. Бубнов, Д.П. Степанюк // ЭППТ 2015, Екатеринбург, – 2015г.
4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ. 2014
5. Добрусин Л.А. Фильтрокомпенсирующие устройства для преобразовательной техники. – М.: НТФ “Энергопрогресс”, 2003. – 84 с.
6. Управление качеством электроэнергии / И.И. Карташев, В.Н. Тульский, Р.Г. Шамонов и др.; под ред. Ю.В. Шарова. – М.: МЭИ. 2006. – 320 с.
7. Качество электрической энергии: современное состояние, проблемы и предложения по их решению / Л.И. Коверникова, В.В. Суднова, Р.Г. Шамонов и др.; отв. ред. Н.И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2017 – 219 с.
8. Александров, Д. С. Надёжность и качество электроснабжения предприятий: учебное пособие / Д. С. Александров, Е. Ф. Щербаков.– Ульяновск : УлГТУ, 2010 – 155 с.
9. Булычева, Е. А. Анализ современных методов определения фактического вклада потребителей в общий уровень несинусоидальности напряжения электрической сети. Часть 2. Методы статистического анализа данных / Е. А. Булычева, С. А. Янченко // Промышленная энергетика. - 2019.

- № 7. - С. 34 - 44.

10. Саенко, Ю. Л. Анализ методов определения фактических вкладов в понижение качества электрической энергии по несимметрии и несинусоидальности напряжений / Ю. Л. Саенко, Д. Н. Калюжный // Электрификация транспорта. - 2015. - № 9. - С. 123 - 133.

References

1. Marenich, K.N. Asynchronous electric drive of mining machines with thyristor switches: monograph / K.N. Marenich.-Moscow; Vologda: Infra-Engineering, 2022.- 132 p.: ill., table.
2. Zhezhelanko I.V. Higher harmonics in power supply systems of industrial enterprises. - 4th ed., rev. and add. - Moscow: Energoatomizdat. 2000. – 331 p., ill.
3. Zyuzev A.M., Application of PKU to improve electromagnetic compatibility with a network of soft start devices for asynchronous motors / A.M. Zyuzev, M.V. Bubnov, D.P. Stepanyuk // EPPT 2015, Yekaterinburg, – 2015.
4. .GOST 32144-2013 Electrical energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Moscow: Standartinform. 2014.
5. Dobrusin L.A. Filter-compensating devices for converter technology. – M.: NTF "Energoprogress", 2003. – 84 p.
6. Power Quality Management / I.I. Kartashev, V.N. Tulskey, R.G. Shamonov et al.; under the editorship of Y.V. Sharov. – M.: MPEI. 2006. – 320 p..
7. Quality of electrical energy: current state, problems and proposals for their solution / L.I. Kovernikova, V.V. Sudnova, R.G. Shamonov and others; Holes. Ed. by N.I. Voropay. - Novosibirsk: Science, 2017 - 219 p.
8. Alexandrov, D. S. Reliability and quality of power supply of enterprises: a textbook / D. S. Alexandrov, E. F. Shcherbakov.- Ulyanovsk: UISTU, 2010 - 155 p.
9. Bulycheva, E. A. Analysis of modern methods for determining the actual contribution of consumers to the general level of non-sinusoidality of the voltage of the electric network. Part 2. Methods of statistical data analysis / E. A. Bulycheva, S. A. Yanchenko // Industrial energy. - 2019. - № 7. - P. 34 - 44. L.,
10. Sayenko Y.L. , Kalyuzhny D. N. Analysis of methods for determining actual contributions to lowering the quality of electrical energy by asymmetry and non-sinusoidality of voltages / Y. L. Sayenko, D. N. Kalyuzhny // Electrification of transport. - 2015. - № 9. - P. 123 - 133.

УДК 621.313.33

Системный подход к продлению жизненного цикла асинхронных двигателей

Н.М. Шайтор¹, А.В. Горпинченко²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹shaytor1950@mail.ru, ²AVGorpinchenko@sevsu.ru

Статья поступила 05.05.2023 г.; после доработки 10.05.2023 г.

Аннотация

Рассмотрена структура взаимосвязей и влияния параметров окружающей среды, системы вентиляции, питающей сети, электрических нагрузок и других воздействий на жизненный цикл электрических машин. Проведен анализ тепловых моделей асинхронных двигателей и исследование влияния параметров и режимов работы на нагревание изоляции и сроки службы асинхронных двигателей. Разработаны и приведены практические рекомендации по ограничению температуры нагревания и продлению теплового ресурса системы изоляции и жизненного цикла асинхронных двигателей с двухслойным ротором.

Ключевые слова: прямой пуск асинхронного двигателя, короткозамкнутый ротор, электродвигатель, бесконтактный пускатель.

A systematic approach to extending the life cycle of asynchronous motors

N.M. Shaytor¹, A.V. Gorpinchenko²

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.
¹shaytor1950@mail.ru, ²AVGorpinchenko@sevsu.ru

Received 05.05.2023 y.; received in final form 10.05.2023 y.

Abstract

The structure of interrelations and influence of environmental parameters, ventilation system, supply network, electrical loads and other impacts on the life cycle of electric machines is considered. The analysis of thermal models of asynchronous motors and the study of the influence of parameters and operating modes on insulation heating and service life of asynchronous motors are carried out. Practical recommendations on limiting the heating temperature and extending the thermal resource of the insulation system and the life cycle of asynchronous motors with a two-layer rotor are developed and presented.

Keywords: direct start of asynchronous motor, short-circuited rotor, electric motor, contactless starter

Введение

При исследовании и проектировании технических объектов, определяющим признаком системного подхода является взаимодействие объектов с социальной и экономической средой через требования к их функционированию, а также оценка технических объектов с позиции эффективности использования и воз-

можности продолжительного функционирования. Электрическая машина (ЭМ) является техническим объектом, и все упомянутые виды взаимодействия также относятся и к ней.

Подробнее рассмотрим влияние условий эксплуатации на жизненный цикл электрических машин, в том числе влияние окружающей среды, тепловые воздействия (температура изо-

ляции, система вентиляции), механические воздействия и электрические нагрузки (рис. 1).

К основным параметрам окружающей среды, влияющим на работоспособность электрических машин, относятся: температура, влажность, загрязнение механическими и химическими примесями, находящимися в воздухе. [1]

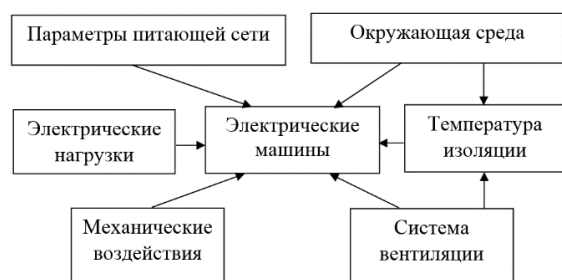


Рис. 1. Влияние условий эксплуатации на жизненный цикл электрических машин

Электрические машины могут эксплуатироваться в различных температурных условиях окружающей среды. Любые изменения температуры, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения от технических условий, неблагоприятно воздействуют на надежность их работы. Причем это воздействие усиливается при увеличении скорости и частота изменения температуры.

Снижение температуры ниже нуля вызывает ухудшение прочностных характеристик металла, резиновых изделий и пластмассы.

Повышение температуры способствует ухудшению изоляционных и механических свойств полимеров, что приводит к выходу из строя изоляционных покрытий. Частые перепады температур ускоряют процесс разрушения обмоток ЭМ.

Вероятность пробоя изоляции возрастает на порядок, если ее сопротивление в 2 раза меньше допустимого (0,5 МОм). При снижении сопротивления изоляции высока вероятность появления такой тяжелой аварии электрического двигателя (ЭД), как пробой обмотки статора на корпус, опасной не только для ЭД, но и для обслуживающего персонала [2].

Проведенный анализ статистических данных о причинах неисправностей электродвигателей позволил сделать вывод о том, что значительную долю составляют отказы ЭД, вызванные старением изоляции обмоток статора под воздействием таких факторов, как влага, агрессивные газы, тепловые и механические

нагрузки [3].

Воздействия атмосферных осадков, в виде снега, дождя, образования льда на элементах электрооборудования ЭМ являются наиболее опасными, т.к. приводят к ухудшению электрических свойств диэлектриков, окислению контактов, разрушению лакокрасочных покрытий, коррозии металлических деталей, ухудшению изоляционных свойств материалов.

При попадании пыли внутрь работающих ЭМ, ухудшается их охлаждение, т.к. забиваются вентиляционные каналы, быстрее изнашиваются контакты и вращающиеся элементы. Кроме того, воздействие сильнодействующих химических примесей увеличивает коррозию металлов, ускоряет процесс старения пластмасс и органических диэлектриков.

Преобразование электрической энергии в механическую сопровождается выделением тепла, оказывающего значительное влияние на надежность и долговечность работы ЭМ. В первую очередь нагреваются ее основные рабочие узлы: статор, ротор и подшипники, а затем все остальные конструкции и кожух, который обеспечивает естественный отвод тепла (10—15%) в окружающую среду.

Для нормальной работы ЭМ, температура окружающей среды не должна превышать 35°C при температуре внутри машины не более 50—52°C, а у ЭМ с кремнийорганической изоляцией эти параметры могут быть увеличены на 10—12°C.

Перегрев сверх допустимой нормы на каждые 8—10°C сокращает срок службы изоляции обмоток электродвигателя в два раза.

При перегрузках более 50 % температура внутри машины начинает резко увеличиваться, что приводит к быстрому разрушению изоляции [4].

Система вентиляции должна обеспечивать регулярный отвод тепла, возникающего в машине в процессе работы; только при этих условиях сохраняется ее номинальная мощность. При неэффективной вентиляции или при ее отсутствии, мощность машины значительно снижается, что ведет к перегреву конструкций и в результате к остановке механизмов. Выбор системы вентиляции во многом зависит от конструктивного исполнения машины.

Механические воздействия, влияющие на жизненный цикл ЭМ описаны в [5,6].

К параметрам питающей сети, влияющим на жизненный цикл ЭМ, относят: отклонение

напряжения, несимметрия напряжения, несинусоидальные режимы и отклонения частоты.

Влияние отклонения напряжения на тепловой режим асинхронных и синхронных двигателей зависит также и от загрузки двигателей. Работа электродвигателей при пониженном напряжении приводит к перегреву изоляции и может явиться причиной выхода их из строя.

При значительной загрузке асинхронных двигателей отклонения напряжения приводят к существенному уменьшению срока их службы. При увеличении тока двигателя происходит более интенсивное старение изоляции.

При отрицательных отклонениях напряжения на зажимах двигателя в 10 % и номинальной загрузке асинхронного двигателя срок его службы сокращается вдвое.

Колебания напряжения так же, как и отклонения напряжения, оказывают отрицательное влияние на работу электродвигателей.

Несинусоидальные режимы оказывают ощутимое влияние на надежность работы электродвигателей. Это объясняется тем, что при наличии высших гармоник в кривой напряжения, более интенсивно протекает процесс старения изоляции, чем в случае работы электрооборудования при синусоидальном напряжении. Так, например, при коэффициенте несинусоидальности 5 %, через два года эксплуатации тангенс угла диэлектрических потерь конденсаторов увеличивается в 2 раза.

Несимметрия напряжения неблагоприятно сказывается на работе и сроке службы асинхронных двигателей. Так, несимметрия напряжения в 1 % вызывает значительную несимметрию токов в обмотках (до 9 %). Токи обратной последовательности накладываются на токи прямой последовательности и вызывают дополнительный нагрев статора и ротора, что приводит к ускоренному старению изоляции и уменьшению располагаемой мощности двигателя.

Известно, что при несимметрии напряжения в 4 % срок службы асинхронного двигателя, работающего с номинальной нагрузкой, сокращается примерно в 2 раза; при несимметрии напряжения в 5 % располагаемая мощность асинхронного двигателя уменьшается на 5—10%.

Магнитное поле токов обратной последовательности статора синхронных машин индуцирует в массивных металлических частях ротора значительные вихревые токи, вызывающие повышенный нагрев ротора и вибрацию вращающейся части машины. При значительной несимметрии, вибрация может оказаться

опасной для конструкции машины.

Нагрев обмотки возбуждения синхронного двигателя за счет дополнительных потерь от несимметрии напряжения приводит к необходимости снижать ток возбуждения, при этом уменьшается реактивная мощность, выдаваемая синхронным двигателем в сеть.

Снижение частоты электрической сети вызывает увеличение тока намагничивания и, в свою очередь, дополнительного нагрева стальных деталей.

На надежность и долговечность работы ЭМ также влияет их нагрузка, и в первую очередь их перегрузка. При достаточно большой длительности и неоднократной повторяемости увеличенного момента на валу работающей машины создается опасный нагрев, вызывающий старение изоляции. Причем, чем быстрее растет температура, тем интенсивнее происходит процесс старения изоляции.

Тепловой расчет асинхронных двигателей с короткозамкнутым и двухслойным ротором

В последние годы усилился интерес к асинхронным двигателям с двухслойными роторами (АДДР), обладающими повышенными пусковыми моментами и пониженными пусковыми токами, и рекомендованными к применению в приводах с тяжелыми условиями пуска и динамическими режимами работы. Конструктивное отличие таких двигателей от асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АДКР) состоит в установленном на шихтованный ротор цилиндре из сплава железо-медь, совмещающего функции проводника электрического тока и магнитного поля [7].

Для установления причинно-следственных связей тепловых и электромагнитных процессов в двухслойных роторах с характеристиками асинхронных электрических двигателей, определяющими ресурс и области их эффективного применения, необходимо решить задачи теплового и электромагнитного расчета асинхронных двигателей и установить качественное влияние теплового поля на электромагнитные характеристики двухслойного ротора.

В процессе исследований применялся метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС). Аналитический метод тепловых схем предпочтительнее численных методов из-за его простоты, надежности и достаточной точности [8, 9].

Он хорошо сочетается с вентиляционным расчетом, что позволяет решать поставленные

задачи исследования, содержащие тепловые и вентиляционные расчеты.

В состав ЭТС входят ветви и узлы. В узлах сосредоточены источники тепла – конструктивные элементы, где происходят потери энергии. По ветвям направлены тепловые потоки. Ветви содержат тепловые сопротивления $R_{i,k}$ между узлами i и k . Тепловые потоки сходятся в узлах. При этом учитывают электрические, магнитные, добавочные, механические потери и потери на перемещение охлаждающей среды.

Приведенную ЭТС получают путем преобразований и сокращений числа узлов (рис. 2). Общая точность всего теплового расчета машин определяется, главным образом, точностью задания исходных данных. Отклонения составляют не более $\pm 10\%$.

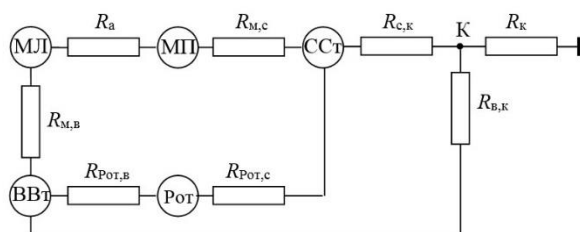


Рис. 2. Приведенная эквивалентная тепловая схема асинхронного двигателя

В приведенную схему включены лобовая МЛ и пазовая МП части обмотки (меди) статора, сердечник статора (ССт), зубцовая зона ротора (Рот), внутренний воздух (ВВт) и корпус (К) – станина и щиты. В узлы ЭТС введены соответствующие потери (для обмоток – при ожидаемой температуре, в узлы ССт и Рот – основные и добавочные, в узел ВВт – механические и внутренние вентиляционные).

Приведенная ЭТС содержит следующие термические сопротивления: R_a – аксиальное меди статора; $R_{м,с}$ – между медью и сердечником статора; $R_{с,к}$ – между сердечником и корпусом; R_k – корпуса, $R_{м,в}$ – между медью статора и внутренним воздухом; $R_{рот,в}$ – между ротором и внутренним воздухом; $R_{рот,с}$ – между ротором и сердечником статора; $R_{в,к}$ – между внутренним воздухом и корпусом.

ЭТС из n узлов, моделирующей электрическую машину как тепловую систему, отвечает совокупность алгебраических уравнений:

$$\sum_{k=1}^n a_{i,k} \Theta_k = \Delta P_i, \quad (1)$$

где $a_{i,k}$ – элементы матрицы; Θ_k – температура

узла k ; ΔP_i – потери в узле i .

Потери в узлах состоят из двух видов потерь: $\Delta P_i = \Delta P'_i + \Delta P_{i0}$. Потерь, не зависящих от температуры: $\Delta P'$, и потерь, которые зависят от температуры: ΔP_{i0} . Их подсчитывают при температуре окружающей среды [9].

Диагональные элементы матрицы

$$a_{i,i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n (-a_{i,k} - \beta_i \Delta P_{i0}) \quad (2)$$

учитывают зависимость потерь от температуры с помощью температурного коэффициента потерь β_i .

Элементы матрицы за пределами диагонали обратно пропорциональны термическому сопротивлению с обратным знаком:

$$a_{i,k} |_{i \neq k} = -1 / R_{i,k}. \quad (3)$$

Температура Θ_k в каждом узле, составляющем электрическую машину, находится с помощью системы алгебраических уравнений (1)-(3).

Электромагнитный расчет асинхронных двигателей

Необходимость учета нелинейной характеристики ферромагнитных материалов и температурная зависимость намагниченности активного слоя двухслойного ротора предопределили применение численного метода – метода конечных элементов (МКЭ). Процедура МКЭ заключается в разбиении областей электромагнитной структуры на однородные подобласти простой формы – треугольники и представлении искомой функции линейной комбинацией базисных функций.

Уравнения Максвелла устанавливают соотношения между соответствующими величинами электрического и магнитного полей в разных точках поля (векторами напряженности поля H , магнитной индукции B , плотности тока j и магнитной проницаемостью среды μ):

$$\left. \begin{aligned} B &= \mu \mu_0 H \\ \text{rot } H &= j \\ \text{div } B &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Подстановка в систему уравнений (4) выражения векторного потенциала A для магнитного поля $H = (1/\mu\mu_0) \text{rot} A$ при решении двухмерной задачи на плоскости (x, y) приводит

к уравнению Пуассона:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right) = -j. \quad (5)$$

В результате решения уравнения Пуассона и объединения вкладов отдельных конечных элементов получают:

$$[K]\{A\} - \{F\} = 0, \quad (6)$$

где $[K]$ – глобальная матрица коэффициентов, представленная функцией геометрии расчётной области и магнитных свойств среды; $\{F\}$ – глобальная матрица векторов тока, учитывающих граничные условия.

Систему нелинейных алгебраических уравнений (6) решают методом Ньютона:

$$\{A\}^{k+1} = \{A\}^k \left([J]^k \right)^{-1} \{\varepsilon\}^k, \quad (7)$$

где $\{A\}^k$ и $\{A\}^{k+1}$ – векторы узловых значений векторного магнитного потенциала на итерациях k и $k+1$; $[J]^k$ – матрица Якоби на k -й итерации; $\{\varepsilon\}^k = [K]^k \{A\}^k - \{F\}$ – вектор невязок на k -й итерации.

Далее строят матрицу Якоби $[J]^k = -\frac{\partial}{\partial A} ([K]^k \{A\}^k)$. Решение системы нелинейных уравнений (6) сводят на каждой итерации к решению системы линейных алгебраических уравнений вида $[J]^k \{Z\}^k = \{\varepsilon\}^k$. Решив эту систему уравнений и определив $\{Z\}^k$, получают значения вектора A на следующей итерации:

$$\{A\}^{k+1} = \{A\}^k + \{Z\}^k. \quad (8)$$

Используя выражение для вектора магнитного потенциала (8), получают значения индукции магнитного поля в треугольном элементе l с вершинами i, j, k :

$$|B|^{(l)} = \sqrt{|B_x^{(l)}|^2 + |B_y^{(l)}|^2}, \quad (9)$$

где $B_x^{(l)} = (1/2 S^{(l)})[c_i c_j c_k]\{A\}^{(l)}$; $B_y^{(l)} = (1/2 S^{(l)})[b_i b_j b_k]\{A\}^{(l)}$ – составляющие магнитной индукции по осям координат; $S^{(l)}$ – площадь конечного элемента, а коэффициенты находят из условий:

$$c_i = x_j - x_k; c_j = x_k - x_i;$$

$$c_k = x_i - x_j; b_i = y_k - y_j; b_j = y_i - y_k; b_k = y_j - y_i.$$

Таким образом, выражения (4) – (9) позволяют определить соотношения между векторами напряжённости поля H , магнитной индук-

ции B , плотности тока j и магнитной проницаемостью среды μ в разных точках поля.

Сравнительный анализ результатов экспериментов на физических моделях и численных расчетов электромагнитных полей показал, что метод конечных элементов обеспечивает высокую точность расчетов [10], при этом ошибка в расчетах составляет не более 5...8 %.

Температура в конструктивных элементах асинхронного двигателя

Исследования проводились с помощью теоретической модели и натурных испытаний маломощного судового асинхронного двигателя 2ДМШ112. Характеристики базового двигателя с короткозамкнутым ротором: мощность – 3 кВт, синхронная скорость вращения – 3000 об/мин, напряжение – 220/380 В, частота – 50 Гц, КПД – 80,7 %, масса – 39 кг. После исследований базового асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (АДКР) из него извлекали ротор, а в статор двигателя поместили двухслойный ротор. Активный материал двухслойного ротора выполнен из сплава СМ20 (20 % меди, 80 % железа, точка Кюри сплава СМ20 – $\Theta_K = 725^\circ\text{C}$).

После замены ротора повторяли те же исследования для АДДР. Расчеты осуществлялись с использованием исходной ЭТС на 18 узлов. Окончательный расчет завершался приведением к схеме на 7 узлов (см. рис. 2). Термические сопротивления двигателей с различными роторами приведены в табл. 1. АДДР имеет повышенное сопротивление между ротором и внутренним воздухом, и сопротивление воздушного зазора между ротором и сердечником статора.

В табл. 2 приведены результаты расчета превышения средних температур основных конструктивных элементов над окружающей средой при номинальной нагрузке базового двигателя $P_n = 3\text{ кВт}$.

Исследования проводились в длительном установившемся режиме S1. Получены превышения температур АДДР в сравнении с базовым двигателем АДКР в роторе – в 1,7 раза, в сердечнике статора – в 1,25 раза, во внутреннем воздухе – в 1,21 раза, в обмотках статора – в 1,14 раза. Вследствие этого АДДР обладает меньшей теплоотдачей, а постоянная нагрева двигателей с двухслойным ротором увеличивается в 1,8 раза по сравнению с АДКР. Данный фактор увеличивает время выхода на температуру установившегося режима, а значит и дли-

тельность работы АДДР в кратковременном режиме. В приводах кратковременных режимов работы АДДР имеет преимущество по нагреву

в том случае, если продолжительность кратковременной работы привода не превышает 70 % постоянной времени нагрева двигателя.

Таблица 1 Средние термические сопротивления двигателей с различными роторами

	Расчетные термические сопротивления приведенной эквивалентной тепловой схемы двигателя	Обозначение	Сопротивление, К/Вт	
			АДКР	АДДР
	Аксиальное – меди статора	R_a	0,0236	0,0236
	Медь статора – сердечник статора	$R_{м,с}$	0,1950	0,1950
	Сердечник статора - корпус	$R_{с,к}$	0,0245	0,0245
	Радиальное – корпуса двигателя	R_k	0,0472	0,0472
	Внутренний воздух – медь статора	$R_{м,в}$	0,4685	0,4685
	Внутренний воздух – ротор	$R_{рот,в}$	0,3860	0,3975
	Ротор – воздушный зазор – сердечник статора	$R_{рот,с}$	0,1554	0,3404
	Внутренний воздух – корпус	$R_{в,к}$	0,1260	0,1260

Таблица 2 Превышение средней температуры двигателей с различными роторами

№ п/п	Элементы тепловой схемы двигателя	Обозначения	Превышение температуры, °С		АДДР к АДКР
			АДКР	АДДР	
1	Лобовая часть обмотки статора	$\Delta\Theta_{мл}$	75,93	86,22	1,14
2	Пазовая часть обмотки статора	$\Delta\Theta_{мп}$	74,53	84,65	1,14
3	Ротор асинхронного двигателя	$\Delta\Theta_{рот}$	207,9	352,41	1,70
4	Сердечник статора двигателя	$\Delta\Theta_{сст}$	36,37	45,32	1,25
5	Внутренний воздух двигателя	$\Delta\Theta_{ввт}$	62,56	75,85	1,21
6	Корпус асинхронного двигателя	$\Delta\Theta_k$	44,98	50,37	1,12
7	В среднем по обмотке статора	$\Delta\Theta_m$	80,87	92,44	1,14

В приводах с частыми пусками преимущества АДДР проявляются вследствие пониженных пусковых токов и греющих потерь. АДДР независимого охлаждения эффективны во всем диапазоне нормированных значений продолжительностей включения 15...60 %, а при самовентиляции – в нижнем диапазоне продолжительностей включения 15...25 % [11].

В применении к двухслойному ротору решена одномерная задача теплопроводности. Получено аксиальное распределение температур в установившихся длительных режимах работы АДДР (рис. 3). Тепловые и электромагнитные расчеты требуют тщательного анализа, поскольку факторы нагрева оказывают существенное влияние на состояние и работу электромеханических преобразователей энергии [12].

Наибольшие температуры наблюдаются в центральной части ротора, при этом максимумы температур смещаются в направлении обдува двигателя, и с повышением нагрузки приближаются к точке Кюри активного сплава $\Theta_k = 725^\circ\text{C}$.

Анализ результатов

При мощностях АДДР, не превышающих 80% номинальной мощности базового двигателя с короткозамкнутым ротором, поле температур практически не влияет на индукцию насыщения, однако с повышением мощности и увеличением градиента температур в роторе, снижение индукции приводит к искажению магнитного поля в роторе и ухудшению рабочих характеристик двигателя.

Авторы выдвигают гипотезу о феномене

наведенной температурной магнитной анизотропии, появляющейся в активном материале двухслойного ротора при тепловых перегрузках. Явление исчезает в равномерном поле температур при охлаждении ротора.

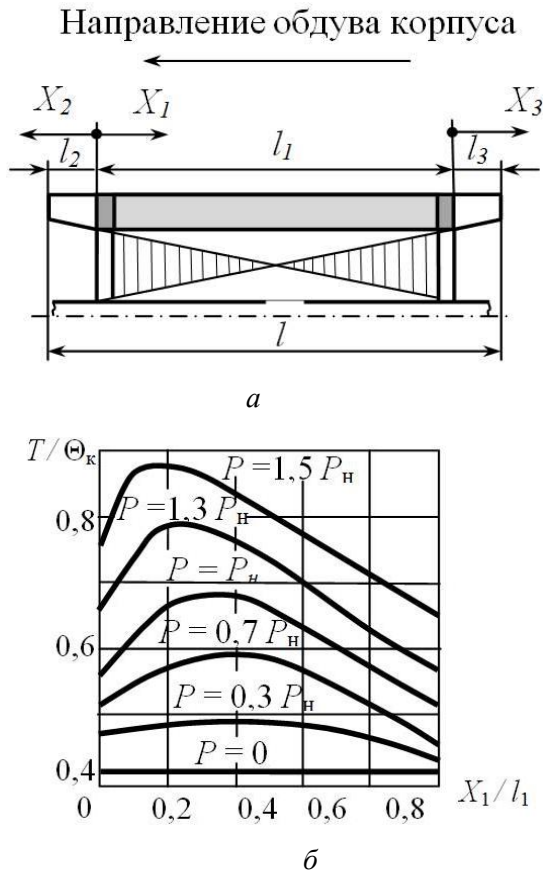


Рис. 3. Температуры двухслойного ротора: а – привязка осей к ротору; б – температура при различных нагрузках.

В равномерном поле температур вектор индукции B совпадает с вектором напряженности H , а ортогональный им вектор электродвижущей силы E имеет аксиальное направление в роторе. При чрезмерном нагревании ротора в неравномерном температурном поле (рис. 4, б), вследствие наведенной температурной анизотропии активного материала, картина магнитного и электрического поля существенно изменяется. Наиболее высокая температура имеет место на поверхности ротора, а наиболее низкая – в районе вала, короткозамкнутых колец и охлаждающих лопаток, поэтому градиент температур направлен под углом к активной поверхности. При этом вектор магнитной индукции B_T тяготеет в сторону «более легкой» оси и не совпадает с вектором напряженности H , вследствие чего

магнитный поток Φ , линии которого направлены по касательной к вектору индукции B_T , вытесняется в сторону короткозамкнутых колец ротора (рис. 4, в).

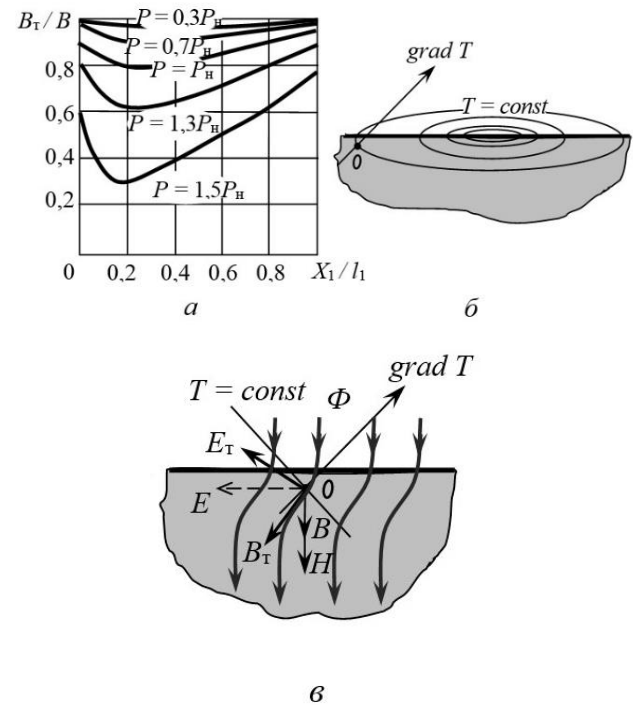


Рис. 4. Магнитное поле в двухслойном роторе асинхронного двигателя: а – распределение магнитной индукции вдоль оси ротора; б – поле температур на поверхности ротора; в – вытеснение магнитного поля в роторе

Наведенная температурная анизотропия оказывает негативное влияние на электрическое поле и потери в роторе, поскольку с отклонением вектора магнитной индукции B_T происходит отклонение вектора электродвижущей силы E_T , индуцируемой в области вытеснения поля. Данный вектор, содержащий радиальную составляющую, приводит к сложной картине распределения токов, увеличивает добавочные потери и нагревание ротора. Кроме того, вследствие температурной зависимости, с повышением температуры растёт удельное электрическое сопротивление ротора, критический момент механической характеристики перемещается в область больших скольжений, а рост скольжения и снижение частоты вращения увеличивают потери скольжения, способствующие нагреванию ротора. При механических и тепловых перегрузках машины имеет место лавинообразный процесс нагревания ротора, ухудшения магнитных и рабочих характеристик, снижения частоты вращения, в результате чего в ходе экспериментальных исследований

наблюдалось «опрокидывание» асинхронного двигателя.

Заключение

Особенности конструкции и физических процессов в АДДР приводят к повышенным тепловыделениям в активном цилиндре, ухудшению отвода тепла и неравномерному нагреву ротора. В длительных режимах работы при номинальных нагрузках и перегрузках температура центральной части ротора может превышать половину температуры точки Кюри железомедного сплава.

Следствием этого является наведённая температурная магнитная анизотропия активного слоя, сопровождающаяся вытеснением магнитного поля на края ротора. При длительных перегрузках снижение индукции в воздушном зазоре горячей зоны может превышать 15 %, а в железомедном сплаве активной части - 35%.

При продолжительных перегрузках и чрезмерном перегреве наблюдаются обратимые лавинообразные физические процессы возрастания термических напряжений, искажения и ослабления магнитного и электрического полей, увеличения электрического сопротивления ротора, повышение скольжения, вплоть до опрокидывания двигателя.

В случае охлаждения, в равномерном поле допустимых температур, активный материал ротора возвращается к исходным изотропным свойствам, а двигатель восстанавливает свои рабочие характеристики. По этой причине не рекомендуется перегружать АДДР или применять их в приводах длительных установившихся режимов работы без снижения номинальной нагрузки на 15...20 %.

В приводах кратковременных режимов работы АДДР имеют преимущество в том случае, если продолжительность кратковременной работы привода не превышает 70 % постоянной времени нагрева двигателя.

В приводах с частыми пусками рекомендуется применять АДДР независимого охлаждения во всём диапазоне нормированных значений продолжительностей включения 15...60 %, а при самовентиляции – в нижнем диапазоне продолжительностей включения 15...25 %.

Для расширения использования АДДР в электроприводах длительного режима работы необходимо продолжение исследований, направленных на снижение температурной зави-

симости магнитных свойств материалов и применение эффективных систем и способов охлаждения роторов.

Список литературы

1. Хорольский В.Я. Проектирование и эксплуатация энергоустановок телекоммуникационных систем: учебное пособие / В.Я. Хорольский, А.Б.Ершов. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2019. 184 с.
2. Михаил С.А. Аварийные режимы асинхронных двигателей 0,4 кВ / С.А. Михаил // Электротехника. 2005. №2. С. 32 – 35.
3. Хомутов С.О. Надежность электродвигателей при воздействии на их изоляцию тепловых и механических нагрузок / С.О. Хомутов, М.А.Панасенко // Проблемы электротехники, электроэнергетики и электротехнологии: Сборник трудов Международной научно-технической конференции. В 3-х ч. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2009. С. 232–234
4. Токовые перегрузки и их влияние на работу и срок службы электродвигателей. [Электронный ресурс]. URL: <http://electricalschool.info/main/drugoe/379-tokovye-peregruzki-i-ikh-vlijanie-na.html> (дата обращения: 01.05.2022).
5. Воробьев К.Б. Прогнозирование срока службы электрических машин: письменные лекции / К.Б. Воробьев, В.Я. Кучер. СПб.: СЗТУ, 2004. 56 с.
6. Рогачев В.А. Диагностирование эксцентриситета ротора асинхронных электродвигателей по гармоническому составу тока статора: дис. канд. техн. наук: 05.09.01 / Рогачев Вячеслав Анатольевич. Новочеркасск, 2008. 173 с.
7. Нагирняк А.А., Высоцкий В.Е. Анализ и оптимизация режимов работы асинхронного двигателя с двухслойным ротором // Modern Science. 2020. № 5-1. С. 551-556.
8. Пугачев А.А., Космодамианский А.С., Иньков Ю.М. Упрощенная эквивалентная тепловая схема замещения статора асинхронного двигателя // Электротехника. 2017. № 9. С. 54–59.
9. Зюзев А.М., Крюков О.В., Метельков В.П., Михальченко С.Г. Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока компрессорных станций магистральных газопроводов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021. Т. 332, № 1. С. 88-96.
10. Горожанкин А.Н., Грызлов А.А., Хаятов Е.С. Расчет потерь и тепловых режимов работы регулируемых электроприводов переменного тока // Электротехника. 2017. № 4. С. 18 – 21.
11. Vysotsky V.F., Nagirniak A.A., Gulyaev I.V., Oleinikov A.M., Chushev V.D. Features of an asynchronous motor with a double-layer rotor in ship pumping equipment. Russian Electrical Engineering, 2019, vol. 90, no 1, pp. 2-6.

12. Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Саяхов И.Ф., Ематин Е.Л. Электромагнитный и тепловой анализ электрических машин из композитных материалов // Вестник МЭИ. 2020. № 2. С. 52 – 61.

Vestnik MEI. 2020. No. 2, pp. 52-61.

References

1. Khorolsky V.Ya. Ershov A.B. Design and operation of power plants of telecommunication systems: textbook // М.: FORUM: INFRA-M, 2019. 184 p.
2. Mikhail S.A. Emergency modes of asynchronous motors of 0.4 kV / S.A. Mikhail // *Electrical Engineering*. 2005. No.2. pp. 32-35.
3. Khomutov S.O., Panasenkov M.A. Reliability of electric motors under the influence of thermal and mechanical loads on their insulation // *Problems of electrical engineering, electric power industry and electro-technology: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference. In 3 hours Togliatti: Publishing House of TSU*, 2009. pp. 232-234.
4. Current overloads and their effect on the operation and service life of electric motors. [electronic resource]. URL: <http://electricalschool.info/main/dru-goe/379-tokovye-peregruzki-i-ikh-vliyanie-na.html> (accessed: 01.05.2022).
5. Vorobyov K.B., Kucher V.Ya. Forecasting the service life of electric buses: written lectures // SPb.: NWTU, 2004. 56 p.
6. Rogachev V.A. Diagnosing the eccentricity of the rotor of asynchronous electric motors by the harmonic composition of the stator current: *dis. Candidate of Technical Sciences: 05.09.01 / Rogachev Vyacheslav Anatolyevich*. Novocherkassk, 2008. 173 p.
7. Nagirnyak A.A., Vysotsky V.E. Analysis and optimization of the modes of operation of an asynchronous motor with a two-layer rotor // *Modern Science*. 2020. No. 5-1. pp. 551-556.
8. Pugachev A.A., Kosmodamiansky A.S., Inkov Yu.M. Simplified equivalent thermal replacement scheme of an asynchronous motor stator // *Electrical engineering*. 2017. No. 9. pp. 54-59.
9. Zyuzev A.M., Kryukov O.V., Metelkov V.P., Mikhailchenko S.G. Assessment of the thermal state of AC electric motors of compressor stations of main gas pipelines // *Izvestiya Tomsk Polytechnic University. Georesource engineering*. 2021. Vol. 332, No. 1. pp. 88-96.
10. Gorozhankin A.N., Gryzlov A.A., Khayatov E.S. Calculation of losses and thermal modes of operation of regulated AC electric drives // *Electrical engineering*. 2017. No. 4. pp. 18-21.
11. Vysotsky V.F., Nagirniak A.A., Gulyaev I.V., Oleinikov A.M., Chushev V.D. Features of an asynchronous motor with a double-layer rotor in ship pumping equipment. *Russian Electrical Engineering*, 2019, vol. 90, no 1, pp. 2-6.
12. Ismagilov F.R., Vavilov V.E., Sayakhov I.F., Ematin E.L. Electromagnetic and thermal analysis of electric machines from composite materials //

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 53.043

Моделирование пьезоэлектрического элемента для генерации электрической энергииФ.М. Аль-Руфай^{1,2}, Б.А. Якимович², В.В. Кувшинов²¹Васитский университет, Васит, Ирак,²Севастопольский государственный университет, Севастополь, 299015, Россия
e-mail: fa99ez@mail.ru

Статья поступила 30.05.2023 г.; после доработки 31.05.2023 г.

Аннотация

В статье рассматривается моделирование пьезоэлектрического материала в программе COMSOL Multiphysics. В результате исследования была выявлена зависимость между механическими и электрическими характеристиками материала, а также его способность генерировать электрический ток при деформации. Результаты моделирования были проанализированы и сопоставлены с экспериментальными и теоретическими результатами консольной балки ПЭ. Результаты согласуются с экспериментальными и теоретическими результатами. Полученные результаты могут быть использованы для разработки новых пьезоэлектрических материалов и устройств, а также для оптимизации существующих конструкций. Таким образом моделирование пьезоэлектрического материала в программе COMSOL Multiphysics является одним из наиболее эффективных и точных способов анализа свойств этого материала.).

Ключевые слова: пьезоэлектрический элемент, моделирование, кантилевера форма, электрическое напряжение, программа COMSOL.

Modeling a piezoelectric element to generate electrical voltageF.M. Al-Rufae^{1,2}, B.A. Yakimovich², V.V. Kuvshinov²¹Wasit University, Wasit, Iraq,²Sevastopol State University, Sevastopol, 299015 Russia
e-mail: fa99ez@mail.ru

Received 30.05.2023 y.; received in final form 31.05.2023 y.

Abstract

This article discusses the modeling of a piezoelectric material in the COMSOL Multiphysics software. As a result of the study, the relationship between the mechanical and electrical characteristics of the material, as well as its ability to generate electric current during deformation, was revealed. The simulation results were analyzed and compared with the experimental and theoretical results of the PE cantilever beam. The results are consistent with experimental and theoretical results. The results obtained can be used to develop new piezoelectric materials and devices as well as optimize existing designs. Thus, modeling a piezoelectric material in COMSOL Multiphysics is one of the most efficient and accurate ways to analyze the properties of this material

Keywords: piezoelectric element, modelling, cantilever shape, electrical voltage, COMSOL program.

Введение

Пьезоэлектрические материалы физически деформируются в присутствии электрического

поля или, наоборот, производят электрический заряд при механической деформации. Этот эффект возникает из-за спонтанного разделения за-

ряда в определенных кристаллических структурах, что приводит к образованию электрического диполя. Для пьезоэлектрического материала известно, что выходное напряжение материала является функцией напряжения. Обычно напряжение достигается за счет смещения или изгиба пьезоэлектрической балки [1-3].

В настоящее время моделирование пьезоэлектрических элементов ПЭ с помощью программного обеспечения является одним из наиболее эффективных способов разработки и оптимизации конструкций пьезоэлектрических устройств. Одним из наиболее популярных программных пакетов для моделирования ПЭ является COMSOL Multiphysics [4]. В данной статье рассмотрим процесс моделирования пьезоэлектрического элемента с помощью COMSOL. Для этого мы создадим модель ПЭ, который будет состоять из пьезокерамического материала, подключенного к источнику напряжения. Первым шагом в создании модели является создание геометрической модели пьезоэлектрического элемента. Для этого можно использовать инструменты, доступные в COMSOL, такие как Mesh или CAD-интерфейс. После создания геометрической модели необходимо задать свойства материалов, используемых в модели. В нашем случае используем пьезокерамический материал, поэтому необходимо задать его свойства, такие как диэлектрическая проницаемость, ПЭ и т.д. Следующим шагом является задание граничных условий для нашей модели. Для пьезоэлектрического элемента мы должны задать условия на границах, которые будут соответствовать реальным условиям работы устройства. После задания всех необходимых параметров и граничных условий может запустить моделирование. COMSOL использует численные методы для решения уравнений, описывающих поведение пьезоэлектрического материала в нашей модели [5-7]. Результаты моделирования могут быть представлены в виде графиков и таблиц, что позволяет нам анализировать поведение нашего пьезоэлектрического устройства и оптимизировать его параметры. Таким образом, моделирование пьезоэлектрических элементов с помощью COMSOL позволяет инженерам и ученым быстро и эффективно создавать и оптимизировать конструкции пьезоэлектрических устройств, а также проводить анализ их поведения в различных условиях эксплуатации.

Исследование, представленное в этой статье, направлено на моделирование балочного устройства PZT в программе COMSOL для гене-

рации электрического напряжения путем преобразования окружающих вибраций в полезную электрическую энергию и сравнение результатов моделирования с теоретическими и практическими результатами для того же элемента в работе [1]. В работе [1] авторы разработали простую математическую модель простой генерации напряжения консольным устройством PZT, основанную на классическом анализе консольной балки, и сравнили ее с экспериментальными результатами.

Материалы и методы

Тонкий слой ЦТС был прикреплен к слою алюминиевой балки с использованием типичной униморфной конфигурации (см. рис. 1). Модель PZT PSI-5A4E производства Piezo Systems Inc. использовалась для покрытия алюминиевой балки в качестве пьезоэлектрического слоя для «изготовления устройства» [1]. Размеры и свойства материалов для ПЭ приведены в таблице 1.

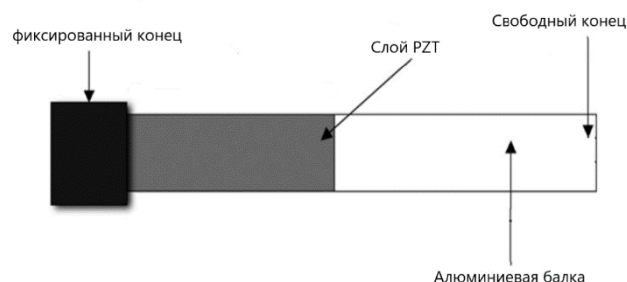


Рис. 1 Пьезоэлектрический элемент [1]

3D-МКЭ модель пьезоэлемента в COMSOL

МКЭ (метод конечных элементов) является одним из наиболее распространенных методов моделирования пьезоэлектрических материалов в программе COMSOL Multiphysics [8,9]. Этот метод позволяет учитывать нелинейные свойства ПЭ, такие как пьезоэффект и диэлектрическая проницаемость [10,11]. Одним из ключевых преимуществ моделирования с помощью COMSOL является возможность проведения параметрического анализа и оптимизации параметров пьезоэлектрического элемента [12]. Это позволяет ученым и инженерам находить оптимальные значения характеристик элемента, такие как его форма, размеры, материалы и т.д., которые обеспечивают максимальную эффективность и

производительность устройства. Процесс моделирования пьезоэлектрического материала в программе COMSOL включает следующие шаги:

Шаг 1: Создание геометрической 3D-модели:

Для моделирования рассматривалась трехмерная геометрия. Пьезоэлектрический преобразователь имеет униморфную консольную форму, как показано на рис. 1. Устройство выполнено из алюминиевой подложки для повышения общей эластичности конструкции с пьезоэлектрическим слоем сверху, поляризованным по направлению толщины. консольные балки связаны с нулевым смещением во всех направлениях с левой стороны и свободны с правой стороны. Размеры конструкции и свойства материалов показаны на рисунке 2 и в таблице 1.

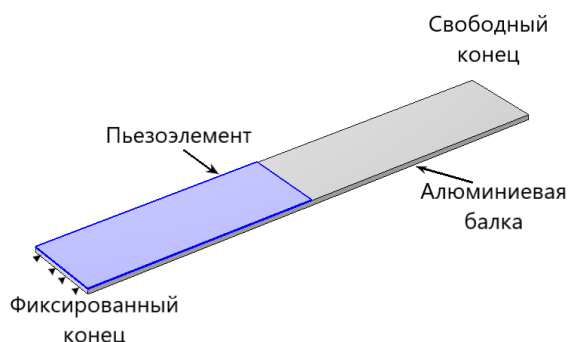


Рис. 2 Конечно-элементная модель пьезоэлектрического биморфного кантилевера в COMSOL

Таблица 1 Размеры и свойства материалов ПЭ и алюминиевой балки

Материал	Параметр	Значение
PZT-5H	Длина мм	72.4
	ширина мм	25
	толщина мм	0.267
	Модуль Юнга ГПа	66
	Константа пьезодеформации Кл/Н	190е-
	диэлектрическая проницаемость м/В	12
Алюминий	Длина мм	150
	ширина мм	25
	толщина мм	1.57
	Модуль Юнга ГПа	70

Шаг 2: Определение физических свойств

материала: В таблице 1 представлены размеры, типы и характеристики материалов, используемых при моделировании.

Шаг 3: Задание граничных условий и нагрузок

Поскольку в анализе используется пьезоэлектрический материал, должен установить два различных набора граничных условий. Во-первых, это механические граничные условия, во-вторых, электрические граничные условия. С точки зрения механических граничных условий нагрузка, Модель смоделирована с частотной нагрузкой 58,6 Гц и различной амплитудой вибрации от 0,3 до 1,8 мм. Для электрического граничного условия нижняя поверхность диска задается как заземление, а верхняя поверхность задается как электрический потенциал.

Шаг 4: Создание сетки

Оптимальная плотность сетки определяется путем постепенного увеличения плотности сетки, начиная с грубой сетки и получения соответствующих конечных результатов. Следуя этому методу, было обнаружено, что по мере увеличения плотности сетки окончательные результаты также изменяются на значительную величину [13]. Размер ячейки варьировался от 0,3 мм до 1 мм, чтобы обеспечить точное представление геометрии устройства, см. рисунок 3.

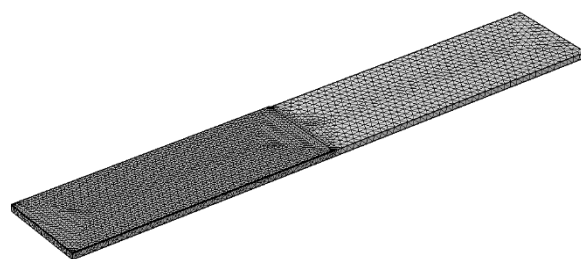


Рис. 3 Плотность сетки

Шаг 5: Анализ и результаты

Частотный анализ проводился по порядку при частоте нагрузки равной 58,6 Гц.

Результаты и обсуждение

Предложенная модель была смоделирована для исследования и сравнения аналитического и экспериментального результата в [1]. Параметры, используемые при моделировании, представляют собой значения, указанные в таблице 1. Пьезоэлектрические модели моделируются для получения генерируемого напряжения для различных амплитуд. Результаты механического воздействия и генерируемого электрического

напряжения показаны на рисунке (4) и рисунке (5) соответственно при значении амплитуды 0,33 мм.

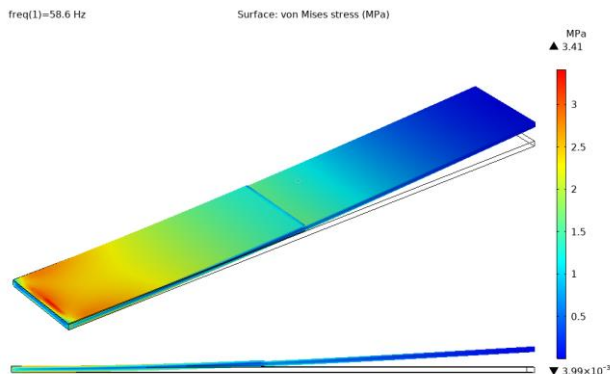


Рис. 4 механическое напряжение ПЭ

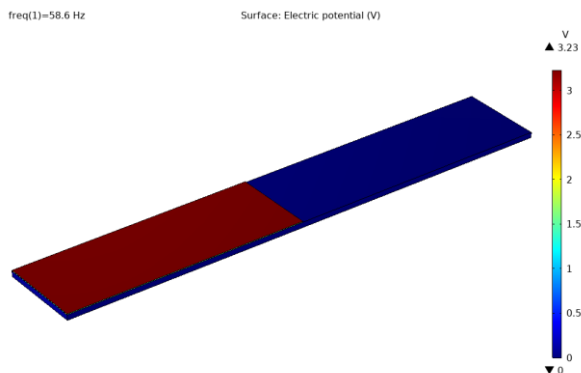


Рис. 5 Выходное электрическое напряжение ПЭ

Сравнение результатов

Результаты электрического напряжения, предложенной моделью, были сопоставлены с теоретическими и экспериментальными результатами. В таблице ниже показано сравнение результатов моделирования с помощью COMSOL с экспериментальными и теоретическими результатами в [1]. В таблице 2 и на рисунке 6 показано сравнение экспериментальных и теоретических результатов с результатами моделирования в COMSOL электрического напряжения как функции амплитуды вибрации кончика балки.

Результаты показали, что предложенные модели моделирования в COMSOL согласуются с экспериментальными и теоретическими результатами из [1]. Таким образом, моделирование пьезоэлектрических элементов в программе COMSOL является важным инструментом для научных исследований и проектирования устройств на основе пьезоэлектрической технологии

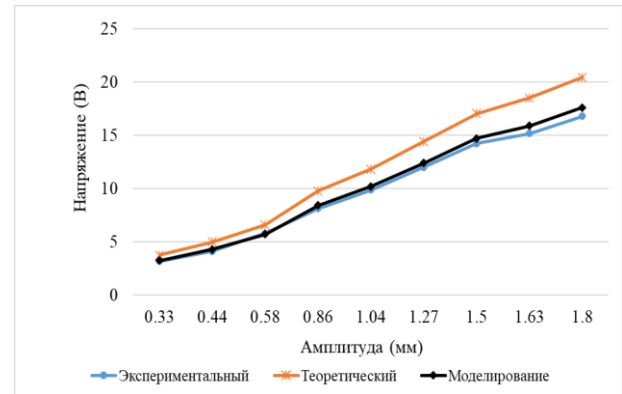


Рис. 6 Результаты выходного напряжения

Таблица 2 Сравнение результатов

Амплитуда (мм)	Электрическое напряжение (В)		
	Эксперимент.	Теоретический	Моделирование
0.33	3.19	3.75	3.23
0.44	4.1	5	4.3
0.58	5.8	6.58	5.7
0.86	8.11	9.76	8.41
1.04	9.87	11.81	10.2
1.27	11.99	14.42	12.4
1.5	14.22	17.03	14.7
1.63	15.16	18.51	15.9
1.8	16.8	20.44	17.6

Заключение

В данной статье была рассмотрена модель пьезоэлектрического элемента в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Результаты моделирования были проанализированы и сопоставлены с экспериментальными и теоретическими результатами консольной балки ПЭ. Результаты согласуются с экспериментальными и теоретическими результатами.

Таким образом, модель пьезоэлектрического элемента, разработанная в программном комплексе COMSOL, является эффективным инструментом для прогнозирования характеристик пьезоэлектрических материалов и устройств, что открывает новые возможности для их использования в различных отраслях промышленности и науки.

Список литературы

1. A. Nechibvute Modelling of a PZT beam for voltage generation/ Nechibvute A., Akande, A.R., Luhanga, P.V.C, // Pertanika Journal of Science and Technology, 2011, 19 (2), pp. 259-271.
2. Rjafallah A., et al. Modeling of polyurethane/lead zirconate titanate composites for vibration energy

- harvesting/ Rjafallah A., et al. // *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 53, pp. 613–623.
3. Аль-Руфай, Ф. М.М. Основные положения методики оценки эффективности пьезопреобразователей / Ф. М. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // *Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова*. – 2023. – Т. 26, № 1. – С. 28-34. – DOI 10.22213/2413-1172-2023-1-28-34.
4. Ф. М.М. Аль-Руфай Моделирование и анализ работы системы накопления пьезоэлектрической энергии при помощи программной среды Matlab/Simulink / Ф. М. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов [и др.] // *Интеллектуальные системы в производстве*. – 2022. – Т. 20. – № 3. – С. 24-33.
5. Аль-Руфай, Ф. М. Исследование технических характеристик пьезоэлемента с помощью программы Matlab / Ф. М. Аль-Руфай // *Инженерный вестник Дона*. – 2023. – № 1(97). – С. 223-236.
6. Steimner and Martins, INC: <https://www.steminc.com/PZT/en/piezo-ceramic-disc-35x12mm-s-190-khz>
7. S. Rafique Piezoelectric Vibration Energy Harvesting: Modeling & Experiments/ S. Rafique // Springer International Publishing, Berlin, 2018, 172 P.
8. H. Khanbareh Piezo-particulate composites. Manufacturing, properties, applications. / H. Khanbareh, V.Yu. Topolov, C.R. Bowen // Cham: Springer Nature, 2019.– 160 p.
9. Sumit Shukla R Finite element method coupled with TLBO for shape control optimization of piezoelectric bimorph in COMSOL Multiphysics/ Sumit, Shukla R, Sinha AK. // *SIMULATION*, 2021;97(9):635-644. doi:10.1177/00375497211025640
10. de Almeida B. V., Topology Optimization of the Thickness Profile of Bimorph Piezoelectric Energy Harvesting Devices/ de Almeida B. V., Pavanello R. // *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2019, vol. 5, pp. 113–127.
11. Carlos De Marqui Junior, An electromechanical finite element model for piezoelectric energy harvester plates/ Carlos De Marqui Junior, Alper Erturk, Daniel J. Inman// *Journal of Sound and Vibration*, vol. 327, Issues 1–2, 2009, pp. 9-25.
12. Zdenek Hadas, Vibration Energy Harvesting for Wireless Sensors/ Zdenek Hadas, Sa'sa Zelenika, Vikram Pakrashi// MDPI, Basel, 2022, 242 P.
13. Mourched B, Piezoelectric-Based Sensor Concept and Design with Machine Learning-Enabled Using COMSOL Multiphysics/ Mourched B, Hoxha M, Abdelgalil A, Ferko N, Abdallah M, Potams A, Lushi A, Turan HI, Vrtagic S.// *Applied Sciences*. 2022; 12(19):9798.
1. A. Nechibvute Modelling of a PZT beam for voltage generation/ Nechibvute A., Akande, A.R., Luhanga, P.V.C, // *Pertanika Journal of Science and Technology*, 2011, 19 (2), pp. 259-271.
2. Rjafallah A., et al. Modeling of polyurethane/lead zirconate titanate composites for vibration energy harvesting/ Rjafallah A., et al. // *Journal of Composite Materials*, 2018, vol. 53, pp. 613–623.
3. Al-Rufae, F. М.М. Osnovnyye polozheniya metodiki otsenki effektivnosti p'yezopreobrazovateley / F. M. M. Al-Rufae, B. A. Yakimovich, V. V. Kuvshinov // *Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova*. – 2023. – Vol. 26, № 1. – P. 28-34. – DOI 10.22213/2413-1172-2023-1-28-34.
4. F. М.М. Al-Rufae Modelirovaniye i analiz raboty sistemy nakopleniya p'yezoelektricheskoy energii pri pomoshchi programmnoy sredy Matlab/Simulink / F. M. M. Al-Rufae, B. A. Yakimovich, V. V. Kuvshinov [i dr.] // *Intel'ktual'nyye sistemy v proizvodstve*. – 2022. – Vol. 20. – № 3. – P. 24-33.
5. Al-Rufae, F. M. Issledovaniye tekhnicheskikh kharakteristik p'yezoelementa s pomoshch'yu programmy Matlab / F. M. Al-Rufae // *Inzhenernyy vestnik Dona*. – 2023. – № 1(97). – P. 223-236.
6. Steimner and Martins, INC: <https://www.steminc.com/PZT/en/piezo-ceramic-disc-35x12mm-s-190-khz>
7. S. Rafique Piezoelectric Vibration Energy Harvesting: Modeling & Experiments/ S. Rafique // Springer International Publishing, Berlin, 2018, 172 P.
8. H. Khanbareh Piezo-particulate composites. Manufacturing, properties, applications. / H. Khanbareh, V.Yu. Topolov, C.R. Bowen // Cham: Springer Nature, 2019.– 160 p.
9. Sumit Shukla R Finite element method coupled with TLBO for shape control optimization of piezoelectric bimorph in COMSOL Multiphysics/ Sumit, Shukla R, Sinha AK. // *SIMULATION*, 2021;97(9):635-644. doi:10.1177/00375497211025640
10. de Almeida B. V., Topology Optimization of the Thickness Profile of Bimorph Piezoelectric Energy Harvesting Devices/ de Almeida B. V., Pavanello R. // *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 2019, vol. 5, pp. 113–127.
11. Carlos De Marqui Junior, An electromechanical finite element model for piezoelectric energy harvester plates/ Carlos De Marqui Junior, Alper Erturk, Daniel J. Inman// *Journal of Sound and Vibration*, vol. 327, Issues 1–2, 2009, pp. 9-25.
12. Zdenek Hadas, Vibration Energy Harvesting for Wireless Sensors/ Zdenek Hadas, Sa'sa Zelenika, Vikram Pakrashi// MDPI, Basel, 2022, 242 P.
13. Mourched B, Piezoelectric-Based Sensor Concept and Design with Machine Learning-Enabled Using COMSOL Multiphysics/ Mourched B, Hoxha M, Abdelgalil A, Ferko N, Abdallah M, Potams A, Lushi A, Turan HI, Vrtagic S.// *Applied Sciences*. 2022; 12(19):9798.

References

1. A. Nechibvute Modelling of a PZT beam for voltage generation/ Nechibvute A., Akande, A.R., Luhanga,

УДК 620.311.243, 620.92

Комбинированные системы солнечного энергоснабжения, совмещенных с конструкциями зданий и сооружений

Кувшинов В.В.¹, Касницкий А.Д.¹, Власов Н.А.¹, Артеменко И.Д.¹,
Березняк В.А.¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, VVKuvshinov@sevsu.ru, makkas_snab@mail.ru,
Mr.asphodel@mail.ru, leftysingle@gmail.com, gern96-10@mail.ru

Статья поступила 30.05.2023 г.; после доработки 31.05.2023 г.

Аннотация

В работе описана комбинированная установка для преобразования потока солнечной радиации в тепловую и электрическую энергию. Эта установка представляет собой гелиофиль для монтажа в кровли зданий и сооружений. За счет широкого спектра преобразования солнечного излучения этот профиль имеет высокие энергетические характеристики.

Ключевые слова: солнечная фотоэлектрическая установка, гелиофиль, термофотоэлектрический коллектор, фотоэлектрический модуль, коэффициент преобразования.

Combined systems of solar energy supply combined with the structures of buildings and structures

Kuvshinov V.V., Kasnitsky A.D., Vlasov N.A., Artemenko I.D., Bereznayak V.A.

¹Sevastopol State University, 33, Universitetskaja st., Sevastopol, 299053, Russia VVKuvshinov@sevsu.ru, makkas_snab@mail.ru, Mr.asphodel@mail.ru, leftysingle@gmail.com, gern96-10@mail.ru

Received 30.05.2023 y.; received in final form 31.05.2023 y.

Abstract

The paper describes a combined installation for converting the flow of solar radiation into thermal and electrical energy. This installation is a solar profile for installation in the roofs of buildings and structures. Due to the wide spectrum of solar radiation conversion, this profile has high energy characteristics.

Key words: solar photovoltaic installation, helioprofile, thermophotovoltaic collector, photovoltaic module, conversion factor.

Введение

В результате сжигания невозобновляемых ресурсов в атмосферу планеты выбрасываются вредные вещества, что негативно влияет на жизнь человека и других живых существ. В настоящее время во всем мире появляется все больше исследований, связанных с оценкой финансовой жизнеспособности проектов возобновляемой энергетики. И целью данной статьи явля-

ется определение самых перспективных в области солнечной энергетики исследований для внедрения их в повседневную жизнь человека.

Специалисты считают, что небольшого количества солнечной энергии достаточно для удовлетворения потребностей людей не только сейчас, но и в будущем. Если рассматривать энергию, поступающую на Землю от Солнца, даже с учетом эффектов поглощения или рассеяния в атмосфере, то она в 1500 раз больше, чем энергия

в совокупности для изучаемых в настоящее время ископаемых видов топлива [1].

При этом с экологической точки зрения энергетический баланс Земли и картина ее биосферы совершенно не изменятся, независимо от энергопотребления. Однако не всегда есть положительные моменты. Солнечный свет должен улавливаться и преобразовываться в форму энергии, которую легко использовать людям. Кроме того, резервные модули должны поддерживать питание ночью и в пасмурные дни. Одной из целей работы является определение самых перспективных в области солнечной энергетики исследований для внедрения их в повседневную жизнь человека. В частности, использование встроенных в кровлю зданий солнечных установок, которые могут преобразовывать поток солнечной радиации в широком спектре частот. При этом производить преобразование солнечного излучения в тепловую и электрическую энергию [2].

Постановка задачи

Также одним из перспективных методов использования солнечной энергии является крыша из комбинированного гелиопрофиля, который заменяет черепицу. Гелиопрофиль – кровельный материал, выполняющий простые кровельные функции, а также служащий для обогрева дома и выработки электроэнергии за счет фотовольтаики. Он изготовлена из алюминия и монокремниевых фотоэлементов [3]. При разработке комбинированного солнечного гелиопрофиля плоской конструкции можно использовать несколько типов комбинации приёмной поверхности – комбинированного абсорбера (рис. 1). В такой конфигурации приёмная поверхность фотоэлектрического модуля одновременно является и абсорбером теплового коллектора.

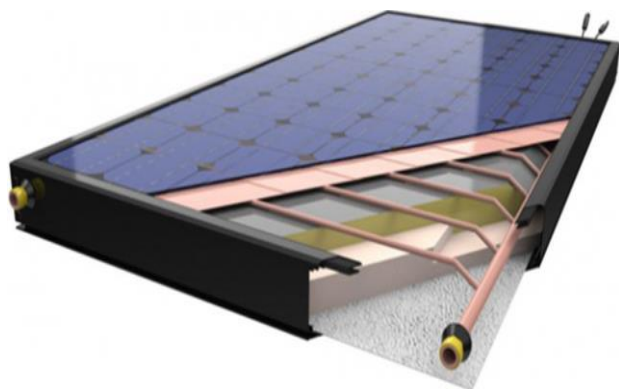


Рис. 1. Термофотоэлектрический гелиоколлектор

При этом для абсорбера не требуется дорогого селективного покрытия, необходим лишь эффективный теплообмен между солнечными элементами и металлической пластиной, к которой с нижней стороны приварены трубки с теплоносителем [4]. Солнечные элементы могут быть наклеены на уже готовый абсорбер гелиоколлектора, в этом случае солнечные элементы покрывают какой-то процент площади абсорбера. Количество элементов определяется из необходимой электрической мощности солнечной установки (рис. 2).

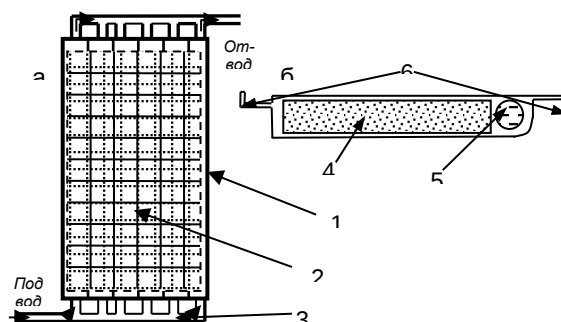


Рис. 2. Термофотоэлектрический гелиопрофиль, встраиваемый в кровлю зданий, (а – приёмная поверхность, б – разрез отдельного элемента профиля): 1 – приёмная металлическая пластина абсорбера; 2 – кремниевые фотопреобразователи; 3 – трубки для подвода и отвода теплоносителя; 4 – канал для воздуха (или теплоаккумулирующего) материала; 5 – канал для жидкого теплоносителя; 6 – крепежные элементы профиля.

Результаты исследования

Для более эффективной работы солнечные элементы можно располагать в нижней части пластины абсорбера. При такой конфигурации, при выборе оптимального теплового режима циркуляции теплоносителя, все солнечные элементы будут работать при определенной температуре. Температура воды на входе в гелиоколлектор ниже, чем на выходе, поэтому металлическая пластина с пониженной температурой будет охлаждать элементы [5]. Кремниевые солнечные элементы, более эффективно работают при пониженных температурах (рис. 3).

Чтобы улучшить энергетические результаты такой кровли, необходимо спроектировать дом с точки зрения солнечного света и площади контакта крыши, а также времени пребывания на Солнце. Хотя человеческий глаз может наблюдать свет, он не может уловить весь спектр. Эти прозрачные панели в основном отражают инфра-

красный и ультрафиолетовый свет [6]. Весь полученный свет транспортируется по контуру панели, где преобразуется в электричество.

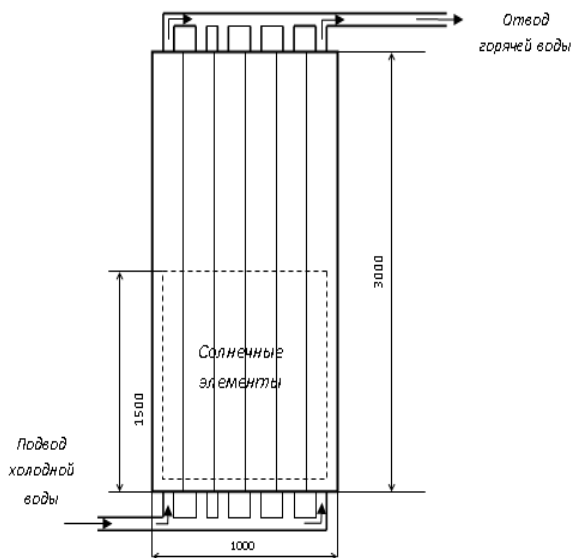


Рис. 3. Термофотоэлектрический гелиопрофиль (фотоэлементы расположены в нижней части)

Теоретически в зданиях без крыш, пригодных для солнечных батарей, каждое окно можно превратить в солнечный приемник. Особенно здания с большим количеством стекла. Если это развитие будет коммерчески жизнеспособным, оно может легко компенсировать большую часть энергопотребления больших зданий.

Для домовладельцев и владельцев магазинов это покрытие снова может помочь сократить счета за электроэнергию.

Технические характеристики такого профиля:

- Установки имеют длину до 7 м и состоят из отдельных секций шириной 15 см, что дает возможность покрывать ими площади различных размеров и конфигурации.
- Комбинированный термофотоэлектрический гелиопрофиль заменяет кровельную конструкцию,
- При условии средней площади кровли для одного частного жилого дома 100 м², максимальная удельная тепловая мощность комбинированной установки составит 70 кВт, а электрическая 15 кВт.
- Устойчив к непогоде (буря, ветер, дождь), так как изготовлен из закаленного стекла;
- Отлично заменяет гладкую черепицей, обеспечивая тем самым однородность поверхности крыши.

Хотя человеческий глаз может наблюдать свет, он не может уловить весь спектр. Этот гелиопрофиль преобразует широкую часть спектра. Тепловой абсорбер преобразует в основном инфракрасный и видимый свет, а кремниевые фотоэлементы — коротковолновую область видимого и ультрафиолетовый свет. Весь полученный свет преобразуется по поверхности профиля, где преобразуется в тепло и электричество.

Из-за увеличения спроса в последние несколько лет цена фотоэлектрических преобразователей на мировом рынке снижается. Картина использования фотоэлементов ясна.

Использование солнечных комбинированных батарей выгодно не только с экономической, но и с экологической точки зрения.

К тому же если внедрить перспективные методы в повседневную жизнь, то в скором времени человек и вовсе может забыть о сгораемых видах топлива. К 2050 году планируется, что солнечная энергия сможет обеспечивать человечество на 30-40% электроэнергии. Кроме того, многие правительства по всему миру оказывают финансовую поддержку развитию солнечной энергетики, что способствует ее быстрому росту.

Выводы

Солнечная установка с комбинированным абсорбером для выработки тепловой и электрической энергии, созданная на основе серийного полноразмерного промышленного гелиопрофиля и серийных фотопреобразователей, встраиваемого в кровлю или стены зданий и сооружений обладает значительной эффективностью. За счет использования всего спектра и солнечного излучения она способна работать с высоким коэффициентом преобразования (КП).

Экспериментальные данные, полученные при сравнении работы тепловой и теплофотоэлектрической установок, подтверждают полученные теоретические расчеты по увеличению КП.

Теоретически в зданиях без крыш, пригодных для солнечных батарей, каждую кровлю можно превратить в солнечный приемник. Особенно здания с большой площадью кровли.

Если это развитие будет коммерчески жизнеспособным, оно может легко компенсировать большую часть энергопотребления больших зданий.

Для домовладельцев и владельцев магазинов это покрытие снова может помочь сократить счета за электроэнергию.

Список литературы

1. Основные сценарии и тенденции развития мировой энергетики. Калимуллин Л.В. 2019. № 3 (537). С. 66-82.
2. Кремневые солнечные батареи: Учебное пособие / А.Я. Глиberman, А.К. Зайцева. - Госенергоатомиздат., 1961. — 74 с.
3. Увеличение выработки солнечных электростанций энергосистемы республики Крым и города Севастополя / Гурьев В.В., Кувшинов В. В., Якимович Б. А., Вестник ИжГТУ имени Калашникова. 2020. Т. 23. № 3. С. 77-83.
4. Байерс Т. 20 Конструкции с солнечными элементами: Пер. с англ. — М.: Мир, 1988. - 197 с.
5. Использование солнечной генерации в системе электроснабжения/ Аль Баирмани А.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5. № 2. С. 69-73.
6. Костиков В. Г. Источники электропитания электронных средств. Схемотехника и конструирование: Учебник для ВУЗов / Костиков В.Г. Парфенов Е.М. Шахнов В.А. / М.: Горячая линия — Телеком, 2001.— 344 с.

References

1. Main scenarios for the development of world energy. Kalimullin L.V. 2019. No. 3 (537). pp. 66-82.
2. Silicon solar cells: Textbook / A.Ya. Gliberman, A.K. Zaitsev. - Gosenergoatomizdat., 1961. - 74 p.
3. Increase in the output of small power plants of the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Guryev V.V., Kuvshinov V.V., Yakimovich B.A., Bulletin of IzhGTU named after Kalashnikov. 2020. V. 23. No. 3. S. 77-83.
4. Byers T. 20 Constructions with solar cells: Per. from English. - M.: Mir, 1988. - 197 p.
5. The use of solar generation in the power supply system / Al Bairmani A.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Power plants and technologies. 2019. V. 5. No. 2. S. 69-73.
6. Kostikov V.G. Sources of power supply of electronic means. Circuitry and design: A textbook for universities / Kostikov V.G. Parfenov E.M. Shakhnov V.A. / M.: Hotline - Telecom, 2001. - 344 p.

УДК 620.9

Некоторые подходы к расчету, конструированию и изготовлению ветрогенераторов с различной магнитной системой

А.М. Олейников¹, В.Л. Червинский², Якимович Б.А.³, Эктор Эдуардо Роа²¹ФГБНУ Институт природно-технических систем (ИПТС), г. Севастополь, pts@list.ru²Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, 220013, Республика Беларусь, chervinsky@mail.ru³ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет

Статья поступила 31.05.2023 г.; после доработки 01.06.2023 г.

Аннотация

В работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований ветрогенераторов с различными магнитными системами. Предложены конструктивные решения, позволяющие снизить значение искажения магнитного поля, что подтверждается результатами обработки полученных данных.

Ключевые слова: Ветряные турбины, Текущее состояние, электричество, возобновляемые источники энергии.

Some approaches to the calculation, design and manufacture of wind turbines with different magnetic systems

A.M. Oleinikov¹, V.L. Chervinsky², B.A. Yakimovich³, Hector Eduardo Roa²¹ФГБНУ Институт природно-TECHNICHESKIH SYSTEM (IPTC), г. Севастополь²Belarusian National Technical University, Minsk, 220013, Republic of Belarus, chervinsky@mail.ru³Sevastopol State University, Sevastopol, 299015 Russia

Received 31.05.2023 y.; received in final form 01.06.2023 y.

Abstract

The paper presents the results of experimental and theoretical studies of wind turbines with various magnetic systems. Design solutions are proposed to reduce the value of magnetic field distortion, which is confirmed by the results of data processing.

Keywords: Wind Turbines, Current Status, electricity, renewable energy sources.

Введение

Важной тенденцией современной автономной гидро- или ветроэнергетики является стремление к предельному упрощению конструкции установок, в частности к применению без редукторных систем, в которых турбина непосредственно связана с вращающимся элементом генератора – ротором или статором, а заданная при проектировании частота тока обеспечивается соответствующим выбором числа полюсов. Мощность таких установок используется для отопления, освещения, электропитания бытовых потребителей, средств связи и др. и может достигать

15...25 кВт, а их стоимость зависит как от выбора магнитной системы, так и системы управления [1,13,15]. При простейших электрических схемах напряжение и частота на выходе генератора оказываются нестабильными и нестандартными, однако, вырабатываемая им энергия с успехом может быть утилизирована с помощью выпрямителей, аккумуляторов, нагревательных и других устройств, а потребности в качественной электроэнергии со стабилизированными параметрами надежно обеспечиваются применением высокоэкономичных инверторов [2,14].

Система электрогенерации в таких системах

строится на магнитоэлектрических синхронных генераторах (СГПМ), в которых эффективно реализуются преимущества современных постоянных магнитов – их высокая энергетическая плотность, а у новых материалов для постоянных магнитов – меньшая зависимость от температурных изменений. Эти качества являются решающими при выборе конструкций ветрогенераторов, в то же время успешная реализация той или иной конструктивной схемы СГПМ может быть достигнута только на основе ее оптимального проектирования [3,12]. В методике практического расчета [4,5,16] тихоходного синхронного генератора малой мощности с постоянными магнитами узловыми исходными параметрами выступают геометрические размеры активного ядра машины (диаметр расточки статора D_i , активная длина L_i , воздушный зазор δ), электромагнитные параметры (линейная нагрузка A_i , магнитная индукция в зазоре B_δ и плотность тока в обмотке статора j_1) и обмоточные данные статора (число пазов на полюс и фазу Q_1 , число последовательно соединенных витков фазы W_1 , число параллельных ветвей a_1 , сечение проводников обмотки и др.), а также геометрия (размеры, объем) и параметры (B_r, H_c) высококоэрцитивных постоянных магнитов. В СГПМ сразу задавать точные значения A_i, B_δ не представляется возможным, так как в реальной машине они зависят от типа, характеристик и степени использования магнитов, необходимый объем которых зависит как от расчетной мощности и характеристик нагрузки, так и от типа магнитной системы СГПМ.

Исходя из опыта проектирования и испытаний СГПМ и рекомендаций различных источников в качестве предварительных значений выбираются: для линейной нагрузки $A_i = (3, 0...3, 5) \cdot 10^4$ А/м; для плотности тока в обмотке статора $j_1 = (4, 5...6, 0)$ А/мм²; для магнитной индукции в зазоре при холостом ходе $B_{\delta 0} = (0, 75...0, 8)$ Тл. Выбор геометрических размеров активного ядра СГПМ проводится на основании опыта проектирования подобных генераторов с электромагнитным возбуждением, а также с учетом принятых в электромашиностро-

ении стандартных высот оси вращения электрических машин.

В данном проекте реализована методика оптимального выбора исходных варьируемых параметров: линейная нагрузка A_i , индукция постоянного магнита B_r , геометрические размеры постоянных магнитов (высота h_m , длина l_m и ширина b_m), а также плотность тока в обмотке j_1 при заданной геометрии активного ядра машины. Ее целью является получение максимального коэффициента полезного действия (КПД) η при ограничении температуры перегрева обмотки $\theta_{см.ср}$ и конечно при условии возможности расположения обмотки в пазу или в активной зоне статора принятой геометрии [6,20].

Коэффициент полезного действия СГПМ

$$\eta = \frac{P_n}{P_n + \Sigma \Delta P} \quad (1)$$

определяется по номинальной заданной мощности P_n и суммарной мощности потерь $\Sigma \Delta P$, в которую входят потери в меди обмотки $\Delta P_{m1} = 3I_n^2 r_1$, потери в стали статора механические $\Delta P_{mex} = 6 \cdot 10^{-3} n_n^2 D_i^3$ и дополнительные потери $\Delta P_d = 0,02 P_n$.

В выражении для потерь в стали обозначены:

– B_a и B_z – индукция в спинке и зубцах статора; – m_a, m_z – массы спинки статора и зубцов.

Индукции в спинке статора и зубцах определяются выражениями

$$B_a = \frac{\Phi_{\delta 0}}{2h_a \cdot L_i \cdot k_c \cdot 10^3}; \quad B_z = \frac{B_{\delta 0} \cdot t_{z1}}{b_z \cdot k_c} \quad (2)$$

где $\Phi_{\delta 0} = \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta 0} \cdot b_m \cdot l_m$ – магнитный поток полюса при холостом ходе и неравномерном зазоре; b_m, l_m – ширина и длина магнита; $B_{\delta 0} = \alpha_\delta B_r$ – магнитная индукция в зазоре при холостом ходе.

Необходимая площадь сечения паза статора

определяется по выражению

$$S_n = \frac{u_n q_{ef}}{k_{em}},$$

где $u_n = W_f \frac{6a_{ng}}{Z_1}$ – число эффективных

проводников в пазу статора. С учетом влияния вырубки листов статора и площади пазовой изоляции определяются площадь поперечного сечения паза в свету через общую расчетную площадь паза и площадь корпусной изоляции и прокладок

$$S_{n.св} = 0,96S_{np} - S_{из}. \quad (3)$$

Перегрев обмотки вычисляется на основании расчетов перепадов температуры в изоляции

обмотки статора $\Delta\theta_{из.л} = Q_{из} \frac{\Delta_{из}}{\lambda_{из}}$, в зубцах ста-

тора $\Delta\theta_{z1} = Q_{z1} \frac{b_z \cdot 0,1}{\lambda_{z1}}$, по высоте ярма статора

$\Delta\theta_a = Q_a \frac{h_a \cdot 0,1}{\lambda_a}$, на поверхности статора

$$\Delta\theta_{нов.ст} = \frac{Q_{нов.ст}}{\alpha_i},$$

где обозначены: $Q_{из} = \frac{\Delta P_{m11}}{Z_1 \cdot Pe_1 \cdot L_i \cdot 100}$ –

удельный тепловой поток в изоляции;

$$Q_{z1} = \frac{\Delta P_{m1} + \Delta P_{cm}}{2Z_1 \cdot b_z \cdot L_i \cdot 0,1 \cdot k_c \cdot 100} \text{ – в зубцах}$$

$$\text{статора, } Q_a = \frac{\Delta P_{cm}}{\pi \cdot (D_i + h_a) \cdot 0,1 \cdot L_i \cdot k_c \cdot 100}$$

$$\text{– в ярме статора, } Q_{нов.ст} = \frac{\Delta P_{cm}}{\pi \cdot D_a \cdot 0,1 \cdot L_i \cdot 100}$$

– на поверхности статора.

Превышение температуры пазовой части обмотки статора над температурой окружающей среды определяется суммой

$$\theta_n = \Delta\theta_{из.л} + \Delta\theta_{z1} + \Delta\theta_a + \Delta\theta_{нов.ст}.$$

Перепад температуры лобовых частей над температурой окружающей среды

$$\theta_L = \Delta\theta_{из.L} + \Delta\theta_{нов.L}$$

определяется через такой перепад в изоляции и на поверхности лобовых частей.

Окончательно расчетный перегрев обмотки

статора рассчитывается по соотношению

$$\theta_{cm.ср} = \frac{\theta_n \cdot L_i \cdot 100 + \theta_L \cdot 2l_L \cdot 0,1}{L_i \cdot 100 + 2l_L \cdot 0,1} \quad (4)$$

Для достижения цели оптимизации варьиру-

ются в заданных пределах параметры: A_1 – линейная нагрузка; B_r – индукция постоянного магнита; h_m – высота постоянного магнита; j_1 – плотность тока в обмотке. Пределы изменения этих переменных являются типичными для машин небольшой мощности: $2 \cdot 10^4 \leq A_1 \leq 4 \cdot 10^4$; $0,6 \leq B_r \leq 1,25$; $0,003 \leq h_m \leq 0,01$; $3 \leq j_1 \leq 7$ (здесь A_1 измеряется в А/м; B_r – в Тл; h_m – в м; j_1 – в А/мм²) [7].

Такой подход реализован при расчетах, рассмотренных выше генераторов, а в решения по их конструированию выставлены требования:

- простота конструкция;
- легкий вес;
- применение без редукторного прямого привода;
- обеспечение генерации энергии при высоком к.п.д для заданного диапазона скоростей вращения ротора, обусловленных техническими характеристиками применяемой ветротурбины;
- невысокая стоимость.

В статье рассмотрены конструкции двух типов СГПМ – аксиальный генератор на постоянных магнитах с тороидальным безпазовым сердечником статора и с намоткой катушек типа «gramme – ring type winding» [8] и многополюсный генератор традиционной конструкции с цилиндрическим неподвижным статором и вращающимся ротором. Первый из них может быть ориентирован на ВЭУ относительно малой мощности, второй – на установки средней и большой мощности. Важным дополнительным требованием к ним является также генерирование напряжения синусоидальной формы [9].

Для первого варианта СГПМ изготовлен аксиальный генератор со статором с тороидальным цепным сердечником, на котором размещены три фазы, при этом каждая фаза содержит 12 катушек. Преимуществом таких генераторов является их простая конструкция и, в частности, простота намотки катушек. При изготовлении одной фазы была рассчитана длина провода в одной катушке, которая составила 658 см, а общая длина провода в 12 катушках одной фазы составила

789,6 м. (рис.1). Расчетное сопротивление медного провода одной фазы, при его сечении, равном 0,5 мм², составило 2,68 Ом. Фактически измеренное сопротивление составило 3,1 Ом, что обусловлено дополнительным сопротивлением в соединениях скруткой отдельных катушек фазы.



Рис 1. Общий вид готового статора с намотанной фазой из 12 катушек

На роторе было установлено 12 постоянных магнитов диаметром 3 см и толщиной 1 см (рис.2). Поверхностная намагниченность составила 350 мА/м. Размеры тороидального стального сердечника прямоугольного сечения составили 7х25.5 мм². Его особенностью явилось то, что он был изготовлен из трех витков пластинчато-роликовой цепи размерами 7х8.5 мм².

Для проверки зависимости напряжения генерации от числа оборотов ротора были проведены испытания на специально изготовленном стенде. График этой зависимости для одной фазы показан на рис. 3. Для трехфазной системы напряжений линейное напряжение будет больше в 1,73 раза. Величина же выпрямленного напряжения будет еще примерно в 2 раза больше линейного напряжения. Таким образом, диапазон рабочих оборотов ветрогенератора, при котором уже будет происходить зарядка аккумулятора, будет начинаться примерно со 150 оборотов в минуту.



Рис 2. Общий вид ротора с магнитами тороидального аксиального СГПМ

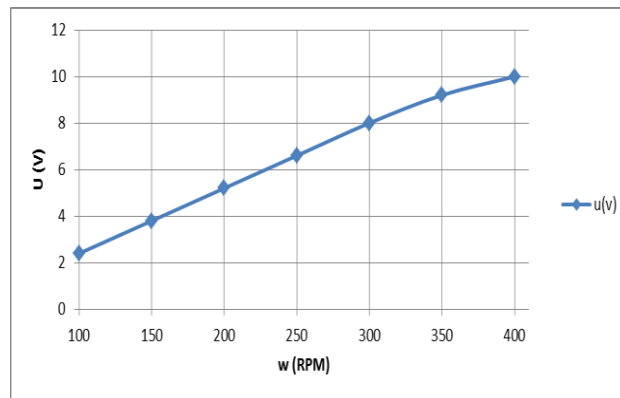


Рис 3. Зависимость напряжения фазы (12 катушек по 70 витков) от числа оборотов ротора

С целью проверки согласования этого значения с максимальным током, который можно получить от одной фазы – током короткого замыкания, были проведены соответствующие исследования (рис.4). Для провода сечением 0,5 мм² максимально допустимый ток составляет 11 А. Из графика на рис.4 видно, что максимальное значение тока короткого замыкания для предельного числа оборотов не превышает значения максимально допустимого тока по сечению провода. Из этого можно сделать вывод, что сечение провода и число витков в катушке подобраны правильно. В дальнейших исследованиях планируется исследование осциллограмм генерируемого напряжения на предмет оценки синусоидальности формы кривой напряжения [17]

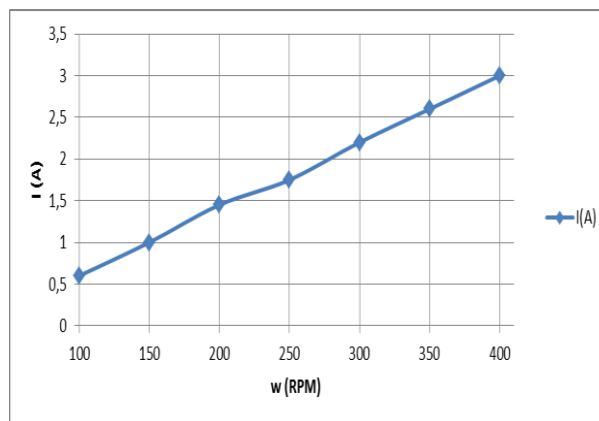


Рис 4. Зависимость тока короткого замыкания фазы (12 катушек по 70 витков) от числа оборотов ротора

Другой образец тихоходного СГ цилиндрического исполнения с постоянными магнитами, подобного варианту СГПМ, описанному в [10,18], рассчитан на скорость $n_n = 125$ об/мин, активную мощность $P_n = 20...25$ кВт, фазное

напряжение $U_{\text{фн}} = 240 \text{ В}$.



Рис 5. Сердечник в сборестатора СГПМ 20 -125

Сердечник статора (рис. 5) набран как обычно из штампованных листов электротехнической стали марки 2212 толщиной 0,5 мм, число пазов $Z_1 = 144$, наружный и внутренний диаметры $D_a = 740 \text{ мм}$ и $D_i = 630 \text{ мм}$, активная длина сердечника $L_i = 200 \text{ мм}$, воздушный зазор $\delta = 2 \text{ мм}$.

Обмотка статора всыпная, однослойная, с диаметральной шагом, предназначенная для укладки в полузакрытые пазы, выполнена в виде отдельных катушек, которые предварительно намотаны на шаблоны специальной формы и имеет следующие параметры:

- число пазов на полюс и фазу и число полюсов $q = 1, 0, 2p = 48$;
- общее число катушек и число катушек в фазе $p_{\text{кат}} = 72, p_{\text{кф}} = 24$;
- линейная нагрузка статора при номинальном токе $A_n = 3 \cdot 10^4 \text{ А /м}$;
- плотность тока $j_1 = 7 \text{ ; А / мм}^2$.

Обод ротора (рис. 6) выточен из массивной цилиндрической поковки магнито-мягкой стали Ст.3 с приемлемой магнитной проницаемостью, на внешней цилиндрической поверхности которой профрезерованы осевые пазы трапецеидальной формы для размещения в них постоянных магнитов. Наружный диаметр сердечника составляет $D_p = 626 \text{ мм}$, его активная длина точно равна длине сердечника статора $L_p = 200 \text{ мм}$, диаметр спицы 60 мм.

Магниты располагаются в пазах трапецеидальной формы, имеющих ширину на 5мм больше ширины магнита, и фиксируются они в пазах при помощи изолирующих немагнитных прокладок толщиной 2,5мм. Реальная длина призматических постоянных магнитов неодим –

железо – бор марки N38, составила $l_m = 200 \text{ мм}$.

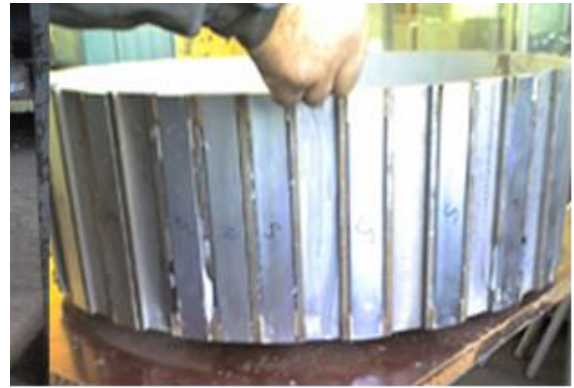


Рис 6. Процесс сборки магнитной системы ротора

Для надежного закрепления магнитов в пазах ротора предусмотрено два мероприятия. Во-первых, своей нижней частью магниты приклеиваются к основанию паза специальным клеем. Во-вторых, свободное от магнитов пространство паза, боковые стенки которого имеют скос, как это показано на рис.6, заполняется диэлектрическими немагнитными клиньями, также втуگوی вставленными в зазоры на клей. Это прочно соединяет магниты, имеющие трапецеидальную форму, и с основанием паза, и с его боковыми стенками, а скос боковых граней пазов обеспечивает прочное удержание всей магнитной конструкции в выточках массивного сердечника, так что дополнительного механического крепления магнитов не требуется.

Испытания генератора проведены на специальном электротехническом стенде; для высокоточной записи параметров СГ в установившихся и переходных процессах использован измерительный комплекс, включающий датчики тока и напряжения, а также крейтовую систему, управляемую посредством персонального компьютера.

Характеристика холостого хода (рис. 7, линия 1) типична для магнитоэлектрического генератора, в котором при неизменной магнитной индукции в зазоре ЭДС, индуцируемая в обмотке якоря, напряжение на выходе и его частота пропорциональны частоте вращения ротора [11,19]. Здесь же приведены результаты измерений напряжения при нагрузке СГ на регулируемое активное сопротивление (кривая 2) и на смешанную активно – индуктивную нагрузку при $\cos \phi = 0,7 \dots 0,9$ (кривая 3) и при поддержании оборотов приводного двигателя.

Как видно, внешние характеристики СГПМ имеют типичный вид, а их наклон определенно

связан с падением напряжения на внутренних сопротивлениях и реакцией якоря; при чисто активной нагрузке изменение напряжения не превышает 5...7%, при смешанной – 10...12 % от напряжения при холостом ходе, что следует отнести к весьма положительному фактору с учетом уникальности геометрии данного типа генератора – высокая относительная длина ($\lambda = L/\tau \approx 5$), большое число полюсов ($2p = 48$), сложная геометрия активной зоны статора, относительно высокие потоки рассеяния.

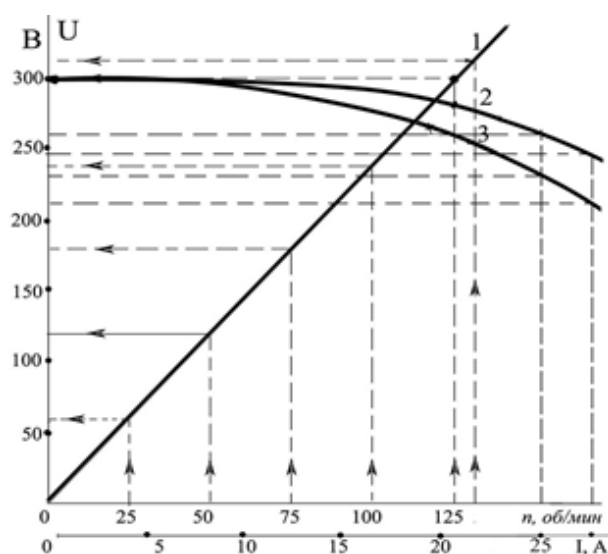


Рис 7. Характеристики СГПМ 20 -125 при холостом ходе и при нагрузке

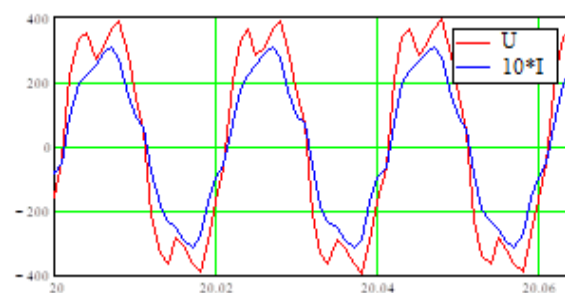
Для исследователей подобных машин могут представить интерес сравнительные данные расчета и эксперимента (таблица 1).

Таблица 1 Сравнительные данные расчета и опыта СГПМ 20 – 125

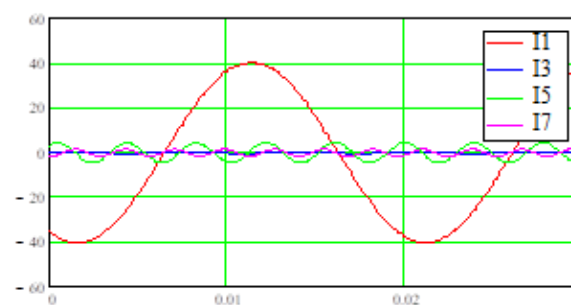
Холостой ход			Нагрузка				
Параметр	f , Гц	$U_{\text{ф}}$, В	n , об/м	$U_{\text{ф}}$, В	$I_{\text{ф}}$, А	P_2 , Вт	Перегрев, °С
Расчет	50	292,3	125	245	26,2	19257	52,7
Опыт	50	291,2	124	264,4	24,25	19020	49
Сопротивление фаз, Ом: $r_{\text{фА}}=0,532$; $r_{\text{фВ}}=0,535$; $r_{\text{фС}}=0,539$ (при $\tau_{\text{ср}}=21^\circ\text{C}$)			Сопротивление фаз, Ом (2 часа, $P_2 = 19$ кВт): $r_{\text{фА}}=0,638$; $r_{\text{фВ}}=0,642$; $r_{\text{фС}}=0,647$; $\tau_{\text{расч}}=49^\circ\text{C}$				

Их табл. 1 хорошо видно, что по основным параметрам – ЭДС холостого хода, мощности и температуре перегрева обмотки статора генератора имеет место вполне удовлетворительное

совпадение расчета и опыта.



а)



б)

Рис 8. Осциллограммы тока и напряжения СГПМ 20 – 125 (опыт)

В заключение приведем осциллограммы напряжения и тока рассматриваемого СГ при чисто активной нагрузке (рисунок 8, а). Коэффициент искажения напряжения достигает в этом случае 17%, что является следствием весьма заметного искажения магнитного поля в воздушном зазоре пазово – зубцово части статора, кривая же тока испытывает значительно меньшие искажения, что хорошо видно при ее гармоническом разложении (рисунок 8, б). В связи с тем, однако, что подобные ВЭУ в полном объеме или частично работают, как правило, на выпрямительную нагрузку, вопросы качества кривой напряжения могут не рассматриваться как определяющие.

Список литературы

1. Васько В.П. Управление параметрами электроэнергии автономных ветроэлектрических установок / В.П. Васько // Техническая электродинамика. – 2002. – №1. – С. 53 – 56.
2. Шидловский А.К. Проблемы преобразования энергии ветроэлектрических установок / А.К. Шидловский, А.И. Лищенко, В.Ф. Резцов // Техническая электродинамика. – 1993. – № 3. – С. 41–45.
3. Струченков В.И. Методы оптимизации в прикладных задачах / В.И. Струченков. – М.: изд –

- во «Солон – Пресс», 2009. – 320 с.
4. Олейников А.М. Инженерная методика оптимизационного расчета тихоходного синхронного генератора с постоянными магнитами / А.М.Олейников, Л.Н. Канов, Е.И. Зарицкая. – Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2008. – Вып. 88. – С. 104 – 107.
 5. Олейников А.М., Канов Л.Н. Оптимизация режима автономной ветроэлектростанции с распределенной системой генерации // Вестник МЭИ. 2021. № 3. С. 63—70. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-63-70.
 6. Олейников А.М. Автономная безредукторная ВЭУ с тихоходным синхронным генератором средней мощности Вестник СевГТУ. Сер. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. – Вып.97.– С.103 – 107.
 7. Агранович Г.А. Параметрическая оптимизация переходных процессов в электрических цепях / Г.А. Агранович, Л.Н. Канов // Электричество. – 1988. – № 9. – С. 72 – 74.
 8. Serdal Arslan, Erol Kurt, Ortzi Akizu, Jose Manuel Lopez-Guede. Design optimization study of a torus type axial flux machine. Journal of Energy System, Volume 2, Issue 2, p. 43-56
 9. E. Muljadi, C. P. Butterfield, Yih-Huei Wan. Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications. National Renewable Energy Laboratory - NREL/CP-500-24996 ü UC Category: 1213.
 10. Данилевич Я.Б. Синхронный генератор с постоянными магнитами для гидравлической турбины небольшой мощности на низкую частоту / Я.Б. Данилевич, В.А. Сапожников, Л.Ю. Штайнле. //Электротехника.– 2002.– №1.–С. 28 – 30.
 11. Высоцкий В.Е., Олейников А.М. Специальные электромеханические преобразователи для электротехнических комплексов автономных объектов. Москва. Изд-во «Инновационное машиностроение», 2019, 365 с .
 12. Олейников А.М., Канов Л.Н. Математическое моделирование режимов работы гибридной электростанции. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEЕ). 2020; № 34-36 (356-358): С.59-70.
 13. Ветроэнергетика /Под ред. Д. Рензо: Пер. с англ.; Под ред. Я.И. Шефтера. - М.: Энергоатомиздат, 1982. – 328с.
 14. Яковлев А.И. Энергетические характеристики ветротурбин различного типа /А.И. Яковлев, М.А. Затучная, О.О. Тыхевич //Авіаційно-космічна техніка і технологія. - Харьков.: Изд-во НАКУ. (ХАИ) 2000. - Вып.2І. - С. 88-91.
 15. Яковлев А.И. Влияние формы и метода построения лопасти ветродвигателя пропеллерного типа на его энергетические характеристики /А.И. Яковлев, М.А. Затучная, В.Н. Пашков //Авиационно-космическая техника и технология.- Харьков: Изд-во ХАИ. - 2000. - Вып. 15. - С. 132-135.
 16. Неисчерпаемая энергия. кн.1. Ветроэлектрогенераторы / В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев.- Харьков: Нац. Аэрокосм ун-т «Харьк. авиац. ин-т», Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2003.- 400с.
 17. Филаретов В.Ф. Разработка системы автоматической стабилизации параметров выходного напряжения автономной ветроэлектрической установки /В.Ф. Филаретов, А.А. Кацурин// Электричество. - 2001. - №7. - С. 37-42.
 18. Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф., Ларионов А.Н. Электрические машины с постоянными магнитами. М.,Л.: Энергия, 1964. 480 с.
 19. Олейников А.М. Моделирование динамического режима автономной ветроэлектрической установки малой мощности / А.М.Олейников, Ю.В.Матвеев, Л.Н.Канов, Е.И.Зарицкая // Труды института электродинамики. – 2009. – № 11. – С. 87–90.
 20. Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия. Кн.2. Ветроэнергетика /В.С. Кривцов, А.М. Олейников, А.И. Яковлев.- Учебник.- Харьков.: Нац. аэрокосм. ун-т ХАИ, Севастополь: Севаст. нац. техн. ун-т, 2004.-519 с.

References

1. Vas'ko V.P. Upravleniye parametrami elek-troener-gii avtonomnykh vetroelektricheskikh ustanovok / V.P. Vas'ko // Tekhnicheskaya elekt-rodinamika. – 2002. – №1. – S. 53 – 56.
2. Shidlovskiy A.K. Problemy preobrazovaniya ener-gii vetroelektricheskikh ustanovok /A.K. Shidlov-skiy, A.I. Lishchenko, V.F. Reztsov // Tekh-nich-eskaya elektrodinamika. – 1993. – № 3. – S. 41–45.
3. Struchenkov V.I. Metody optimizatsii v pri-kladnykh zadachakh / V.I. Struchenkov. – М.: izd – vo «Solon – Press», 2009. – 320 s.
4. Oleynikov A.M. Inzhenernaya metodika opti-mizatsionnogo rascheta tikhokhodnogo sinkhron-nogo generatora s postoyannymi magnitami / A.M.Oleynikov, L.N. Kanov, Ye.I. Zaritskaya. – Vestnik SevGTU. Ser. Mekhanika, energetika, ekologiya: sb. nauch. tr. – Sevastopol', 2008. – Vyp. 88. – S. 104 – 107.
5. Oleynikov A.M., Kanov L.N. Optimizatsiya re-zhima avtonomnoy vetroelektrostantsii s ras-pre-delennoy sistemoy generatsii // Vestnik MEI. 2021. № 3. S. 63—70. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-3-63-70.
6. Oleynikov A.M. Avtonomnaya bezreduktornaya VEU s tikhokhodnym sinkhronnym generatorom sredney moshchnosti Vestnik SevGTU. Ser. Mekhanika, energetika, ekologiya: sb. nauch. tr. – Se-vastopol': Izd-vo SevNTU, 2009. – Vyp.97.– S.103 – 107.
7. Agranovich G.A. Parametricheskaya optimizatsiya perekhodnykh protsessov v elektricheskikh

- tsepyakh / G.A. Agranovich, L.N. Kanov // *Elektrichestvo*. – 1988. – № 9. – S. 72 – 74.
8. Serdal Arslan, Erol Kurt, Ortzi Akizu, Jose Manuel Lopez-Guede. Design optimization study of a to-rus type axial flux machine. *Journal of Energy System*, Volume 2, Issue 2, p. 43-56
 9. E. Muljadi, C. P. Butterfield, Yih-Huei Wan. Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications. *National Renewable Energy Laboratory - NREL/CP-500-24996* ü UC Category: 1213.
 10. Danilevich YA.B. Sinkhronnyy generator s postoyannymi magnitami dlya gidravlicheskoj turbiny nebol'shoj moshchnosti na nizkuyu chastotu / YA.B. Danilevich, V.A. Sapozhnikov, L.YU. Shtaynle. // *Elektrotehnika*. – 2002. – №1. – S. 28 – 30.
 11. Vysotskiy V.Ye., Oleynikov A.M. Spetsial'nyye elektromekhanicheskiye preobrazovateli dlya elektrotekhnicheskikh kompleksov avtonomnykh ob'yektov. Moskva. Izd-vo «Innovatsionnoye mashinostroyeniye», 2019, 365 s.
 12. Oleynikov A.M., Kanov L.N. Matematicheskoye modelirovaniye rezhimov raboty gibridnoy elektrostantsii. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya (ISJAE)*. 2020; № 34-36 (356-358): S.59-70
 13. *Vetroenergetika* /Pod red. D. Renzo: Per. s angl.;Pod red. YA.I. Sheftera. - M.: Energoatomizdat, 1982. – 328s.
 14. Yakovlev A.I. Energeticheskiye kharakteristiki vetroturbiny razlichnogo tipa /A.I. Yakovlev, M.A. Zatuchnaya, O.O. Tykhevich // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. - Khar'kov.: Izd-vo NAKU. (KHAÍ) 2000. - Vyp.2I. - S. 88-91.
 15. Yakovlev A.I. Vliyaniye formy i metoda postroyeniya lopasti vetrodvigatelya propeller'nogo tipa na yego energeticheskiye kharakteristiki /A.I. Yakovlev, M.A. Zatuchnaya, V.N. Pashkov // *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*. - Khar'kov: Izd-vo KHAÍ. - 2000. - Vyp. 15. - S. 132-135.
 16. Neischerpayemaya energiya. kn.1. Vetroelektrogeneratory / V.S. Krivtsov, A.M. Oleynikov, A.I. Yakovlev.- Khar'kov: Nats. Aerokosm. un-t «Khar'k. aviats. in-t», Sevastopol': Sevast. nats. tekhn. un-t, 2003.- 400s.
 17. Filaretov V.F. Razrabotka sistemy avtomaticheskoy stabilizatsii parametrov vykhodnogo napryazheniya avtonomnoy vetroelektricheskoy ustanovki /V.F. Filaretov, A.A. Katsurin// *Elektrichestvo*. - 2001. - №7. - S. 37-42.
 18. Balagurov V.A., Galteyev F.F., Larionov A.N. Elektricheskiye mashiny s postoyannymi magnitami. M.,L.: Energiya, 1964. 480 s.
 19. Oleynikov A.M. Modelirovaniye dinamicheskogo rezhima avtonomnoy vetroelektricheskoy ustanovki maloy moshchnosti / A.M.Oleynikov, YU.V.Matveyev, L.N.Kanov, Ye.I.Zaritskaya // *Trudy instituta elektrodinamiki*. – 2009. – № 11. – S. 87–90.
 20. Krivtsov V.S. Neischerpayemaya energiya. Kn.2. Vetroenergetika /V.S. Krivtsov, A.M. Oleynikov, A.I. Yakovlev.- Uchebnik.- Khar'kov.: Nats. aerokosm. un-t KHAÍ, Sevastopol': Sevast. nats. tekhn. un-t, 2004.-519 s.

УДК 620.92

Использование фотоэлектрических преобразователей для обеспечения промышленных объектов

Чепенюк А.А.¹, Бахтина Н.В., Борисов Б.Е.¹, Меджитов М.Р.¹,
Жильцов А.С.¹

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33
г. Севастополь, 299053, Россия, eingog@gmail.com, bariborisov@gmail.com, mevludmedzhitov@mail.ru,
29novel@gmail.com

Статья поступила 29.05.2023 г. ; после доработки 30.05.2023 г.

Аннотация

Применение автономных систем электроэнергетики для обеспечения промышленных объектов является приоритетной задачей любого государства, а использование для этих целей солнечной генерации позволяет не только улучшить экологическую составляющую, но и обеспечить стационарные объекты без топливными энергетическими установками для круглогодичной работы.

Ключевые слова: автономная система солнечной генерации, фотоэлектрический модуль, трекер слежения, технологический режим, собственные нужды, солнечная установка.

The use of photovoltaic converters to provide industrial facilities

Chepenyuk A.A., Bakhtina N.V., Borisov B.E., Medzhitov M.R., Zhiltsov A.S.

Sevastopol state university, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia,
eingog@gmail.com, bariborisov@gmail.com, mevludmedzhitov@mail.ru, 29novel@gmail.com

Received 29.05.2023y.; received in final form 30.05.2023 y.

Abstract

The use of autonomous power systems to provide industrial facilities is a priority for any state. And the use of solar generation for these purposes allows not only to improve the environmental component, but also to provide stationary facilities without fuel power plants for year-round operation.

Key words: autonomous solar generation system, photovoltaic module, tracking tracker, technological regime, auxiliary needs, solar plant.

Введение

Организация энергетической безопасности промышленных учреждений представляет собой комплекс мер по обеспечению прежде всего бесперебойного электроснабжения данных объектов, несмотря на воздействие внешних негативных факторов. Например, стихийных бедствий, военных действий, террористической угрозы и др. Производственные предприятия — это объекты, где важность бесперебойной поставки электропитания очень сложно переоценить. По

классификации правил устройства электроустановок (ПУЭ) немалая часть эксплуатируемого в медицинских учреждениях оборудования относится к электроприемникам первой категории надежности. Это значит, что даже кратковременный перерыв или сбой их электрообеспечения может повлечь угрозу жизни и здоровью людей. Стабильность работы электроприемников не может ставиться в зависимость от единственного источника электропитания. Перерыв снабжения током допускается лишь на короткий срок вос-

становления питания от резервной системы. Такие системы должны оснащаться автоматикой для своевременного запуска и остановки силовых агрегатов. Комплектация станций должна включать высококлассное оборудование, исключающее внезапный выход системы из строя при условии соблюдения режима и правил обслуживания. Проектирование, монтаж и обслуживание системы должен выполняться специалистами соответствующей квалификации. Минимальная необходимая мощность установки для аварийного обеспечения конкретного учреждения зависит от количества питаемого оборудования, его комплектации, время его использования и др. факторов. Например, при использовании обычных мобильных электрогенерирующих установок мощностью 30 кВт, рекомендуется использовать генераторы в термостойких шумозащитных контейнерах. Также необходимо предусмотреть место для размещения достаточного запаса топлива на случай длительных аварийных ситуаций. В процессе организации системы применяется оборудование, обеспечивающее вторую ступень автоматизации электростанции. Это гарантирует автоматический запуск генератора при пропадании напряжения в сети. По возобновлению подачи тока из основного источника генератор отключается в автоматическом режиме. К первой, самой важной категории надежности по электроснабжению, относятся многие службы производственных учреждений: электрические аппараты, работающие в цехах (это системы жизнеобеспечения: кондиционирование, обогрев, аппараты вентиляции, топливные склады и т.п.). Электроприемники первой категории должны постоянно обеспечиваться электроэнергией, и перерыв электроснабжения может быть допущен только на время автоматического восстановления питания. В качестве такого независимого источника питания традиционно используются автономные дизельные электростанции. Построение системы гарантированного электроснабжения производств – задача не тривиальная, кардинально отличающаяся от автономного электроснабжения коммерческих организаций, производственных предприятий или компаний нефтегазового комплекса. Как показывает практика, в большинстве случаев производственные учреждения вынуждены решать проблемы обеспечения резервного электропитания своими силами, но в связи с тем, что данная работа не является их основной сферой деятельности, делают это зачастую непрофессионально. Как правило, эти работы проводятся без измерений и анализа качества электро-

питания на конкретных объектах и без учета специфических особенностей применяемого оборудования, что может приводить как к избыточным, так и к недостаточным мерам по обеспечению непрерывности электроснабжения сложного специального оборудования. Основной целью дизельной электроустановки (ДЭС) в качестве резервных источников электропитания является именно комплексное решение проблемы предупреждения чрезвычайных ситуаций, связанных с нарушением электроснабжения, влекущих за собой катастрофические последствия для здоровья и жизни людей. Изношенность оборудования стационарной электросети, трансформаторов и ЛЭП — существенный фактор риска для современных учреждений, который нельзя не учитывать. В чрезвычайных обстоятельствах отключения электроэнергии на кону стоит самое важное — здоровье и даже жизнь пациентов. Система резервного электропитания — это оборудование, остро необходимое для современных производств различной направленности. В его отсутствие даже самый квалифицированный персонал не сможет обеспечить безопасность во время технических аварий или при обрыве ЛЭП.

Также основная задача энергобезопасности важнейших объектов первой категории, которыми являются все промышленные учреждения, это обеспечение освещения как самого объекта, так и прилегающей территории. В представленной работе были проанализированы и исследованы системы солнечного освещения.

Постановка задачи

В данной работе были рассмотрены две основные составляющие энергоснабжения производственных учреждений. Первая – это системы автономного резервного электроснабжения, используемые на стационарных подстанциях, обеспечивающих представленные объекты. Вторая – системы наружного освещения учреждений.

Рассмотрим способ снижения потребления (СНПС) с помощью возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [1], в частности с использованием фотоэлектрических панелей. Внедрение ВИЭ в СНПС повышает уровень надежности электроснабжения одновременно с традиционными автономными источниками электроэнергии. Использование солнечной генерации особенно эффективно в контексте круглогодичного потребления.

Солнечные электростанции характеризуются высокой неравномерностью выработки

мощности в зависимости от времени суток и погодных условий. График выработки мощности солнечных электростанций (СЭС) обычно не совпадает с графиком нагрузки потребителей, вследствие чего технически обоснованным является применение систем накопления электрической энергии (СНЭЭ) [2]. Интеграция солнечной генерации в имеющуюся систему СН переменного тока возможна в виде замены питания одной из секций щита СН от трансформаторов собственных нужд (ТСН) на питание от системы генерации, функционирующей на базе ВИЭ (при сходной мощности системы ВИЭ и ТСН, питание от ТСН в этом случае полностью заменяется генерацией, функционирующей на базе ВИЭ). При этом необходимо, чтобы система генерации, функционирующая на базе ВИЭ, интегрируемая в систему СН переменного тока, полностью резервировалась иным источником мощности (внешняя электрическая сеть, генерация на традиционном топливе, накопитель энергии). Интеграция ВИЭ в имеющуюся систему СН переменного тока также возможна в виде дополнения питания одной из секций щита СН от системы генерации, функционирующей на базе ВИЭ (при этом секций щита СН запитана одновременно от ТСН и от генерации, функционирующей на базе ВИЭ) [3].

Задача анализа методов внедрения СЭС в СН ПС состоит в изучении свойств и эффективности системы в зависимости от структуры технологических связей между отдельными ее объектами, а также от конструкционных и технологических параметров системы и параметров технологических режимов установок.

К конструкционным параметрам относятся: количество фотоэлектрических модулей, способы установки (стационарно или с системой слежения), параметры системы накопления электрической энергии.

Параметры технологических режимов оборудования – это уровень инсоляции, угол установки фотоэлектрических модулей, суточный расход электроэнергии собственных нужд подстанции.

Основная задача анализа внедрения СЭС заключается в том, чтобы математически связать характеристику состояния системы (значения полученной электроэнергии) с параметрами и характеристиками состояния аккумулирующего устройства в зависимости от структуры технологических связей между ними в энергетической

системе [4].



Рис. 1. Системы солнечной генерации, применяемые для резервного электроснабжения

Основным генерирующим оборудованием являются фотоэлектрические модули, которые производят постоянный ток, преобразуемый сетевыми инверторами в переменный для приоритетного питания потребителей [5]. Система накопления энергии (СНЭ) служит для накопления части энергии, производимой ФЭМ для питания потребителей в ночные часы, когда выработка на СЭС отсутствует. В целом в зависимости от периода опытный образец компенсирует от 20% до 5% расхода расходом электроэнергии СН ПС ПС 330 кВ. В отдельные солнечные часы в июле при низком потреблении электроэнергии токоприёмниками СН ПС опытный образец полностью покрывал необходимую мощность нагрузки [6].

В соответствии с техническим решением наибольшей мощностью обладает составной элемент ВИЭ – ФЭМ на стационарной опорной конструкции и за весь период ОПЭ данный элемент произвел наибольшее количество электроэнергии – 47% от суммарной выработки.

Результаты исследования

На рис. 2 представлена оценка удельной выработки электроэнергии элементами ФЭМ на 1 фотоэлектрический модуль. Из рисунка видно, что, несмотря на наличие функции слежения за солнцем у трекеров составных элементов ФЭМ_оо и ФЭМ_до наибольшего удельного значения по производству электроэнергии в каждом периоде достигается ФЭМ_ст, с креплением на стационарной конструкции.

В целом в зависимости от периода данная энергоустановка способна компенсировать от 20% до 5% расхода электроэнергии СН ПС ПС 330 кВ. В отдельные солнечные часы в июле при низком потреблении электроэнергии токоприём-

никами СН ПС энергоустановка полностью покрывает необходимую мощность нагрузки [6].

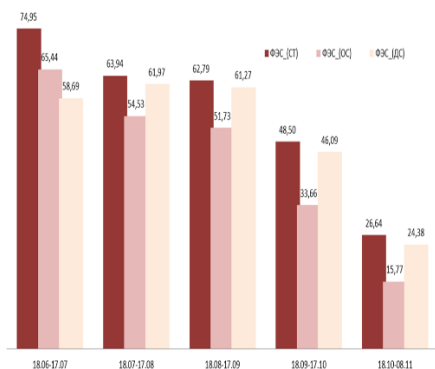


Рис.2. Оценка удельной выработки электроэнергии элементами ФЭМ на один фотоэлектрический модуль, тыс. кВт.ч на модуль

Опытный образец ВИЭ предназначен для электроснабжения собственных нужд среднестатистической ПС 330 кВ напряжением переменного тока с применением фотоэлектрических модулей, инверторного оборудования, ветроэнергетической установки и системы накопления электроэнергии на базе литий-ионных аккумуляторных батарей. Её применение позволит снизить расход электроэнергии на собственные нужды подстанции.

Преимуществами такой реализации являются: существенное снижение зависимости от погодных условий за счет разных используемых ресурсов и за счет применения функции накопления энергии; возможен автономный режим работы; возможность выступать в качестве гарантированного источника электроснабжения в ограниченном временном диапазоне (до суток); возможность выступать в качестве источника бесперебойного питания и подключения к электрической сети на постоянном напряжении.

Несмотря на малую мощность проектируемой энергетической установки в летние периоды, когда инсоляция высокая, а потребление электроэнергии на СН ПС снижается, процент покрытия сгенерированной электроэнергии существенен и достигает за рассматриваемый период в пять месяцев 8,87% от собственных нужд. В первые два периода процент покрытия составил 10,2% и 17,8% соответственно. В отдельные часы ОО ВИЭ полностью «покрывает» необходимую нагрузку СН ПС.

Несмотря на наличие функции слежения за солнцем у трекеров составных элементов ФЭМ_оо и ФЭМ_до наибольшего удельного

значения по производству электроэнергии в каждом периоде достигается ФЭМ_ст, с креплением на стационарной конструкции.

Система солнечного освещения

Одним из наиболее актуальных способов решения задачи освещения пешеходной зоны производственного учреждения является применение мелкогабаритных фотоэлектрических генерирующих станций.

В ходе работы был проведен анализ фотоэлектрических установок, разработанных и применяемых на различных объектах (рис.3).



Рис.3. Осветительная опора

Замысел создать независимую от сетевых источников систему наружного освещения, которое будет само обеспечивать себя электроэнергией, привлекателен и весьма заманчив. Возникает комплекс осветительных приборов, созданный на совершенно иных принципах и создающий новые возможности.

Поскольку соединения с линией электропитания у светильников не имеется, отпадает необходимость в привязке к одному месту. Отпадает потребность в большом количестве дорогостоящего кабеля [4].

Однако, рассматривая автономную систему освещения, нельзя видеть только положительные стороны от ее использования.

Необходимо учесть, что каждый светильник должен обладать собственным комплектом солнечных батарей и накопительной емкостью, позволяющей лампе работать на протяжении всего темного времени суток. Чем оно длительнее, тем мощнее должны быть аккумуляторы и больше площадь фотоэлементов, что усложняет конструкцию и делает ее значительно дороже. В результате может получиться ситуация, когда со-

здание автономной системы окажется значительно дороже, чем монтаж стационарной линии.

Чтобы рассчитать необходимую мощность солнечных батарей нужно знать сколько энергии потребляют светильники.

Сами солнечные батареи вырабатывают солнечную энергию только в светлое время суток. И выдают свою паспортную мощность только при наличии ясного неба и падении солнечных лучей под прямым углом [3].

При падении солнца под различными углами мощность и выработка электроэнергии заметно падает, и чем острее угол падения солнечных лучей, тем падение мощности больше. В пасмурную погоду мощность солнечных батарей падает в 15-20 раз, даже при лёгких облачках и дымке мощность солнечных батарей падает в 2-3 раза, и это всё необходимо учитывать.

При расчёте лучше брать рабочее время, при котором солнечные батареи работают почти на всю мощность, равным 7 часов, это с 9 утра до 4 часов вечера. Панели, конечно, летом будут работать от рассвета до заката, но утром и вечером выработка будет совсем небольшая, по объёму всего 20-30% от общей дневной выработки, а 70% энергии будет вырабатываться в интервале с 9 до 16 часов. Таким образом массив панелей мощностью 1 кВт (1000 ватт) за летний солнечный день выдаст за период с 9-ти до 16-ти часов 7 кВт*ч электроэнергии, и 210 кВт*ч в месяц. Плюс ещё 3 кВт (30%) за утро и вечер, но пускай это будет запасом так-как возможна переменная облачность. И панели у нас установлены стационарно, и угол падения солнечных лучей изменяется, от этого естественно панели не будут выдавать свою мощность на 100%. Если массив панелей будет на 2 кВт, то выработка энергии будет 420 кВт*ч в месяц, а если будет одна панель на 100 ватт, то в день она будет давать всего 700 ватт*ч энергии, а в месяц 21 кВт*ч. Рассчитываем необходимую емкость аккумулятора солнечных панелей (рис. 4).

Это можно изобразить такой упрощенной формулой с условными обозначениями: $E = \frac{M}{H}$, где E – емкость АКБ солнечных панелей, M – потребляемая оборудованием (светильниками) мощность, H – напряжение сети. Чтобы рассчитать, сколько солнечных батарей нужно для энергетической установки, используем формулу: $\Pi = K \cdot S \cdot \text{КПД}$, где Π – производительность одной батареи, K – коэффициент инсоляции (уровня радиации), S – площадь одной батареи, КПД – эффективность батареи в процентах.



Рис.4. Размещение аккумуляторов для электроустановки

Самый минимальный запас ёмкости аккумуляторов, который просто необходим должен быть такой чтобы заряд в АКБ сохранился в тёмное время суток (рис. 5). Например, если с вечера и до утра потребляется 3 кВт*ч энергии, то в аккумуляторах должен быть такой запас энергии. Если аккумулятор 12 вольт 200 А/ч, то энергии в нём поместиться $12 \cdot 200 = 2400$ ватт (2,4 кВт). Но аккумуляторы нельзя разряжать на 100%. Специализированные АКБ можно разряжать максимум до 70%, если больше, то они быстро деградируют. Если установить обычные автомобильные свинцово-кислотные АКБ, то их можно разряжать максимум на 50% [6].

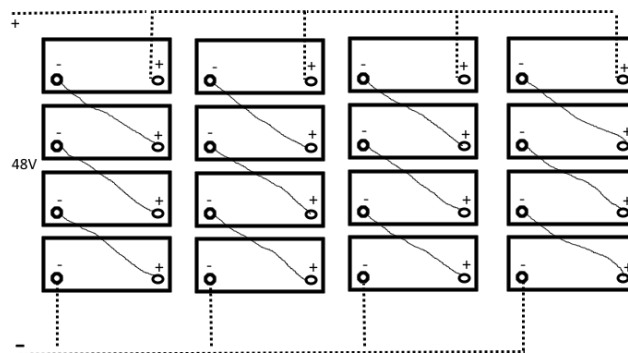


Рис.5. Последовательно-параллельная схема подключения АКБ 12В в 48В

Выводы

Использование предложенной фотоэлектрической системы электроснабжения позволяет быть независимым от поставок электрической энергии и значительно сократить использование

традиционных органических топлив. При использовании комбинированного контроллера заряда и инвертора в одном корпусе с технологией МРРТ общий КПД мини СЭС возрастает на 13% по сравнению с ШИМ контроллером. Предложенная компоновка фотоэлектрической системы позволяет не только её повысить эффективность, но и значительно увеличить количество часов непрерывной работы без поставок электроэнергии от общей сети. Также использование возобновляемых источников энергии позволяет значительно сократить выбросу вредных веществ и улучшить экологическую составляющую.

Список литературы

1. Баадер Б., Доне Е., Брендерфер М. Биогаз: Теория и практика. - М.: Колос. - 1982. -148с.
2. www.e-veterok.ru, solarpanel.today. Инженерно-технический ресурс по проектированию СЭС.
3. Кувшинов В.В., Сафонов В.А. Некоторые результаты исследования комбинированной установки для фототермопреобразования солнечной энергии // Сборник трудов СНУЯЭиП, № 31, 2009, С. 158-163.
4. Бекман У., Кейли С., Даффи Д. Расчет систем солнечного теплоснабжения // Энергоатомиздат, Москва, 1988 г.
5. Кувшинов В.В. Использование солнечных установок для обеспечения энергетической безопасности региона // Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием. Под редакцией Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик. / Севастополь, 11-15 сентября, 2017. С. 715-718.С.
6. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества // Москва 2007.

References

1. Baader B., Done E., Brenderfer M. Biogas: Theory and practice. - M.: Kolos. - 1982. -148s.
2. www.e-veterok.ru, solarpanel.today. Engineering and technical resource for the design of solar power plants.
3. Kuvshinov V.V., Safonov V.A. Some results of the study of a combined installation for the photothermal conversion of solar energy // Collection of proceedings of SNUYaEiP, No. 31, 2009, pp. 158-163.
4. Beckman W., Caylee S., Duffy D. Calculation of solar heat supply systems // Energoatomizdat, Moscow, 1988.
5. Kuvshinov V.V. The use of solar installations to ensure the energy security of the region // Collection of articles based on materials of a scientific and practical conference with international participation. Edited by Yu.A. Omelchuk, N.V. Lyamina, G.V. Kucherik. / Sevastopol, September 11-15, 2017. P.

715-718.

6. Arbuzov Yu.D., Evdokimov V.M. Fundamentals of photo-electricity // Moscow 2007.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК: 662.612.1:662.613.5

Исследование процесса совместного сжигания низкорекреационного ископаемого топлива с древесным углем

А.А. Толокольников¹, А.Ж. Калтаев¹, А.В. Губин^{1,4}, А.С. Горшков^{1,2},
А.К. Асильбеков¹, К.Б. Ларионов^{1,2,3}

¹ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, 634050, Россия, e-mail: anton.tolokolnikov1@gmail.com; azk2@tpu.ru; avg77@tpu.ru; aka2@tpu.ru

²ФГБОУ ВО «Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.Горбачева», Кемерово, 650000, Россия, e-mail: asg47@tpu.ru

³ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет МИСиС», Москва, 119049, Россия, e-mail: laryk@tpu.ru

⁴ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299053, Россия, e-mail: avgubin@sevsu.ru

Статья поступила 11.04.2023 г.; после доработки 12.04.2023 г.

Аннотация

В работе исследованы смесевые топлива на основе полукоксов, подготовленных из антрацита и древесных отходов. По результатам газоанализа продуктов горения смесевых топлив зафиксировано увеличение углерод-нейтрального CO_x в 1,69 раз с ростом концентрации биомассы в смеси до 75 мас.%. Однако, образование NO_x значительно снижается (в 2 раза) ввиду уменьшения термической составляющей при горении топлива.

Ключевые слова: антрацит, древесный полукокс, окисление, зажигание и горение, газофазные продукты.

Co-combustion processes of low-reactivity fossil fuels with charcoal

A.A. Tolokolnikov¹, A.Zh. Kaltaev¹, A.V. Gubin^{1,4}, A.S. Gorshkov^{1,2}, A.K. Asilbekov¹,
K.B. Larionov^{1,2,3}

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia, e-mail: anton.tolokolnikov1@gmail.com; azk2@tpu.ru; avg77@tpu.ru; aka2@tpu.ru

²T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000, Russia, e-mail: asg47@tpu.ru

³National University of Science and Technology «MISiS», Moscow, 119049, Russia, e-mail: laryk@tpu.ru

⁴Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: avgubin@sevsu.ru

Received 11.04.2023 y.; received in final form 12.04.2023 y.

Abstract

In this work, mixed fuels based on semi-cokes prepared from anthracite and wood waste were studied. According to the results of gas analysis of combustion products of mixed fuels, an increase in carbon-neutral CO_x by 1.69 times was recorded with an increase in the concentration of biomass in the mixture up to 75 wt.%. However, the formation of NO_x is significantly reduced (2 times) due to a decrease in the thermal component during fuel combustion.

Keywords: anthracite, semi-coke, oxidation, ignition and combustion, gas-phase products.

Введение

Интенсивное развитие мировой экономики

приводит к увеличению потребления как тепловой, так и электрической энергии [1]. Большая часть производимой энергии в мире приходится

на тепловые станции, работающие на угольном топливе [2]. Существующие программы для достижения углеродной нейтральности предлагают полный отказ от использования ископаемого топлива к 2040 году [3]. Несмотря на это, уголь как обильное и недорогое топливо будет играть важную роль в обеспечении доступной и надежной тепловой и электрической энергии. Кроме того, существуют большие запасы антрацита в мире и в России в частности [4]. Преимущество антрацита в низком содержании азота и серы относительно каменных и бурых углей, а также высокой теплотворной способности [4]. Однако, из-за низкого содержания летучих соединений и высокого содержания углерода, антрацит имеет очень высокую температуру воспламенения [5].

Добавление различных активирующих добавок на основе металлов может значительно снизить температуру зажигания [6]. Обычно доля таких добавок составляет не более 5%, однако из-за большого потребления угля на электростанции стоимость конечного топлива возрастает значительно [6].

В качестве альтернативного решения предлагается совместное сжигание антрацитного полукокса с более реакционным видом топлива. Совместное сжигание топлив применяется в течение многих лет, интерес к нему в последнее время возрос. В качестве высокорекреационного топлива предлагается использовать продукт пиролиза биомассы – полукокс. Полукокс имеет температуру воспламенения гораздо ниже чем антрацит [7]. Кроме того, биомасса и продукты ее термического преобразования не содержат серы и являются углеродно-нейтральным топливом [8].

Целью данной работы является исследование совместного сжигания антрацитового полукокса с древесным углем, полученным после пиролиза биомассы (сосновых опилок). В ходе работы были изучены характеристики горения и зажигания топлив при частичной замене антрацитового полукокса на древесный уголь. Так же был проведен анализ газовых продуктов, выделяющихся в процессе горения смеси. Для оценки изменения реакционных характеристик был проведен термический анализ.

Материалы и методы

В настоящем исследовании был использован антрацит (Красногорское месторождение, Кемеровская область, Россия), подверженный пиро-

лизной обработке при температуре 700 °С. и древесный полукокс, полученный из сосновых опилок (п. Беляй, Томская область, Россия). Образец древесного полукокса был получен методом медленного пиролиза со скоростью нагрева 10 °С/мин до температуры 600 °С с выдержкой по времени на максимальной температуре в течение двух часов.

Далее образцы топлив измельчались в шаровой мельнице в течение 8 часов (массовое соотношение полукокса и мелющих тел 1:1) и просеивались на ситах с размером ячейки менее 80 мкм. Подготовка исследуемых топлив осуществлялась методом механического смешения в следующих массовых соотношениях антрацит/древесный полукокс: 100/0; 75/25; 50/50; 25/75; 0/100 %.

Технические характеристики исследуемых образцов, такие как теплота сгорания, влажность, зольность и выход летучих были определены в соответствии со стандартными методиками: ГОСТ Р 52911-2013, ГОСТ Р 55660-2013, ГОСТ 11022-95 и ГОСТ 147-2013 соответственно. Для определения теплоты сгорания был использован бомбовый калориметр АБК-1 (ООО ИНПК «РЭТ», Россия). Элементный состав был определен с помощью анализатора Flash 2000 CHNS (Thermo Fisher Scientific, США).

Термический анализ исследуемых образцов был выполнен с помощью дифференциального термического анализатора Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Германия). Анализ проводился в воздушной среде (расход газовой среды – 150 мл/мин) при скорости нагрева 10 °С/мин до температуры 1000 °С для образцов массой 15 мг. Все эксперименты проводились в условиях атмосферного давления. Анализ газофазных продуктов окисления образцов (CO₂, SO₂ и NO_x) проводился с помощью сопрягаемого квадрупольного масс-спектрометра QMS 403 D Aeolos (Netzsch, Германия).

Характеристики зажигания и горения топлив, а также состав газофазных продуктов их термического разложения в камере сгорания при T_g = 700 °С были установлены с помощью разработанного экспериментального стенда, представленного в ранее опубликованных работах [9,10].

Результаты и обсуждение

Физико-химические характеристики исследуемых типов топлив представлены в таблице 1.

Данные, представленные в таблице 1, обуславливаются происхождением исследуемых

топлив. Отметим, что полукоксы, полученные из древесных отходов, характеризуется высокой тепловой сгорания ($Q_r^i = 33$ МДж/кг) ввиду значительного содержания несвязанного углерода ($C^d = 87,1$) и сравнительно низкой зольности ($A^d = 2,8$ мас.%). Напротив, полукоксы из антрацита отличаются высокой зольностью ($A^d = 21,4$ мас.%) и незначительным количеством серы ($S = 0,2$ мас.%). Исходя из вышеизложенного, рассмотрение термических и энергетических свойств смесевых топлив на их основе является целесообразным.

Таблица 1. Элементный состав и технические характеристики исследуемых образцов

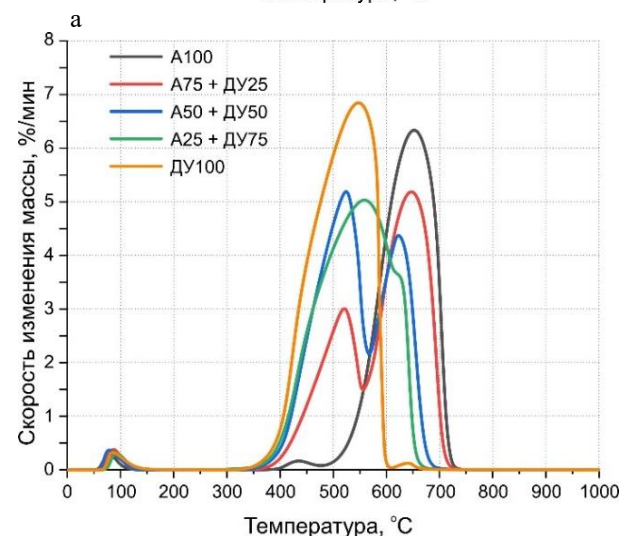
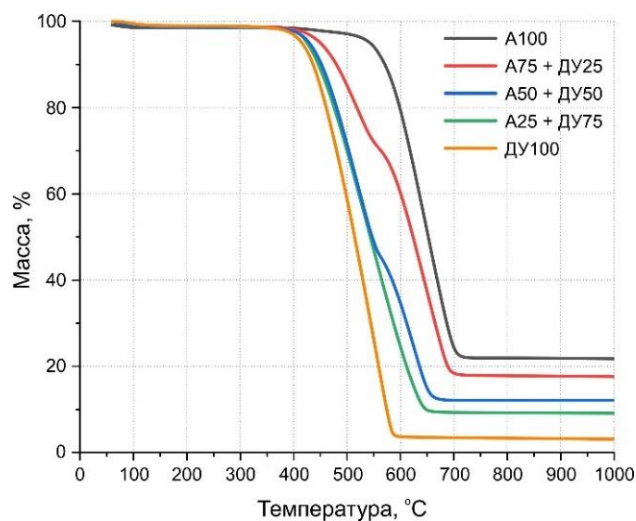
Образец		Полукоксы из древесных отходов	Полукоксы из антрацита
Элементный состав ^d , мас.%	C	87,1	73,8
	H	2,2	1
	N	0,2	1,1
	S	-	0,2
	O	7,7	2,5
Технические характеристики	Теплота сгорания ^r	МДж/кг 33	26,2
	Влажность W^r	1,8	0,7
	Зольность A^d	2,8	21,4
	Выход летучих V^{daf}	8	1,7

^r – рабочее состояние, ^d – сухое состояние, ^{daf} – сухое беззольное состояние

На рис. 1 представлены результаты термического анализа исследуемых образцов полукоксов из антрацита и древесных опилок, а также топливных композитов на их основе в виде ТГ и ДТГ-профилей. Параметры процесса окисления, вычисленные по данным рис. 1, представлены в таблице 2.

Согласно полученным результатам отметим, что профили ТГ, характеризующие процесс окисления (рис. 1а), имеют существенные отличия, что связано с различными соотношениями Н/С и О/С, а также концентрации летучих соединений исследуемых образцов (таблица 1). Так, увеличение доли полукокса, полученного из древесных опилок, приводит к смещению температуры начала интенсивного окисления T_i таких смесевых топлив в низкотемпературную область (таблица 2). Таким образом, разница температуры начала T_i и окончания T_f процесса интенсивного окисления для основных образцов полукокса составила 142 и 105 °С соответственно.

В целом потеря массы происходит в три стадии, которые связаны с удалением адсорбированной влаги до 100 °С и возгонкой остаточных летучих соединений и окислением углерода с последующим его преобразованием в газовую фазу в виде СО и СО₂ в температурных интервалах 360–705 °С (рис. 1б).



б

Рис. 1. Данные ТГ (а) и ДТГ (б) исследуемых образцов. Воздух 150 мл/мин, скорость нагрева 10 °С/мин, масса навески ≈ 15 мг.

Формирование топливной композиции с добавлением полукокса древесных опилок оказывает влияние на полноту окисления такой композиции. Так, увеличение доли опилок до 75 мас.% в составе смеси приводит к увеличению общей потери массы смеси на 12,7 мас.%. Причиной тому является меньшая зольность исходного полукокса древесных опилок относительно полукокса из антрацита. Полученные данные полностью согласуются с результатами технического

анализа (таблица 1).

Отметим, что добавление древесного полукокса в топливный состав приводит к изменению внешнего вида ДТГ-профиля, что выражается образованием дополнительного плеча в низкотемпературной области процесса. Данное плечо характеризует интенсивное окисление легколетучих компонентов, привнесенных древесным полукоксом. Увеличение доли последней до 75 мас.% вызывает снижение максимальной скорости интенсивного окисления $w_{\max}$ на 1,32 мас.%/мин, температуры $T_{\max}$ на 90 °С и расширение области окисления на 43 °С относительно однородного антрацитного полукокса (таблица 2).

Таблица 2. Параметры процесса окисления исследуемых образцов топливных композитов. Вычислены по данным ДТА

Параметр	Топливо				
	Антрацит	Древесина			
ТК, %	100	25	50	75	100
T_i , °С	560	435/563	430/570	427	418
T_f , °С	705	545/690	540/672	645	587
$w_{\max}$, %/мин	6,37	3,05/5,2	5,23/4,4	5,04	6,85
$T_{\max}$, °С	650	520/650	520/625	560	545
$\partial\mu$, %	78,14	82,15	87,94	90,81	96,83

На рис. 2 представлены результаты МС-анализа газофазных продуктов (CO_2 ($m/z=44$), NO_x ($m/z=30$), SO_2 ($m/z=64$)) окисления исследуемых образцов.

Форма МС-профиля для CO_2 - основного продукта горения - фактически является зеркальным отражением соответствующих ДТГ-профилей. Выделение CO_2 связано с окислением десорбирующихся летучих веществ и последующим окислением образующегося углеродного остатка.

Характерные изменения прослеживаются для профилей выделения NO_x и SO_2 . Частичное или полное замещение полукокса из антрацита древесным, приводит к снижению выделения данных продуктов.

Важно отметить, что при добавлении древесного полукокса в количестве 25 мас.% (и выше) выделение диоксида серы не наблюдается.

Это связано, в первую очередь, с практически отсутствием серы в древесном полукоксе, а также с возможным взаимодействием неоргани-

ческой части биомассы и содержащейся в антраците серы с последующим формированием сульфидных соединений в зольном остатке.

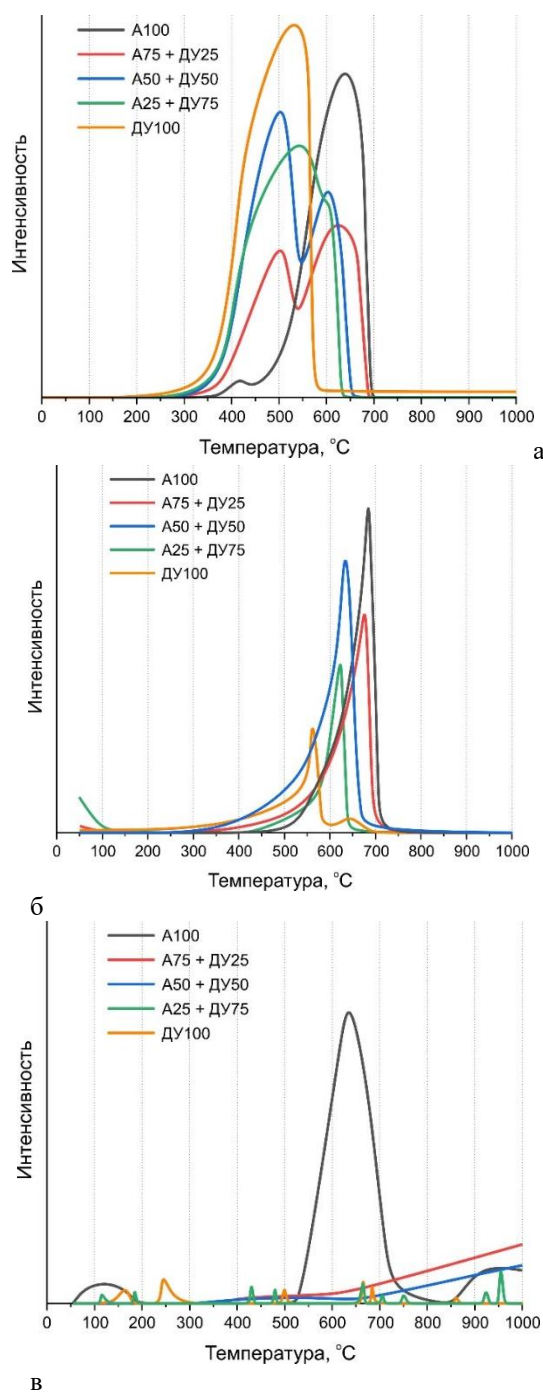


Рис. 2. Данные МС для основных компонентов газовой фазы (а – $m/z=\text{CO}_2$, б – $m/z=\text{NO}_x$, в – $m/z=\text{SO}_2$), образующихся в результате окисления исследуемых образцов.

Расчет подынтегральных площадей профилей, характеризующих выделение NO_x , показал, что увеличение концентрации доли древесного полукокса в исследуемых образцах приводит к

относительному снижению выделения оксида азота в среднем на четверть. Причиной тому может быть снижение температуры интенсивного окисления топлива и уменьшению термического азота в продуктах окисления топлива.

На рис. 3 представлены результаты определения времени задержки зажигания t_i исследуемых образцов с помощью высокоскоростной видеосъемки при температуре греющей среды в камере сгорания 700 °С.

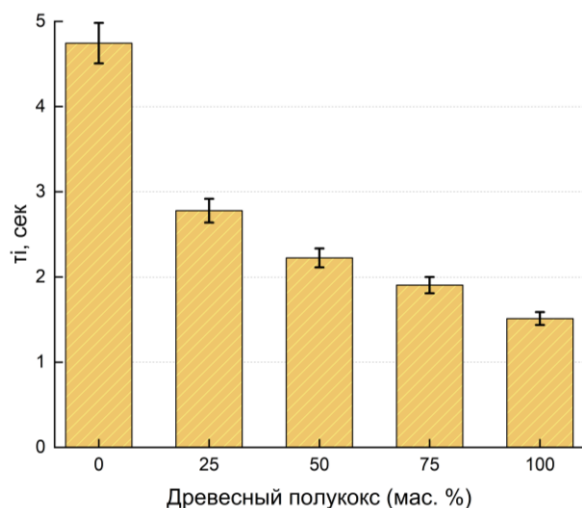


Рис. 3. Время задержки зажигания исследуемых образцов топлив, полученные с помощью скоростной видеосъемки при $t_i = 700$ °С.

Установленное время задержки зажигания топлив (рис. 3) полностью согласуется с результатами термического анализа (рис. 1). Увеличение доли биомассы в смесевом топливе приводит к снижению времени задержки зажигания от 41 до 60 % (при 25 и 75 мас.% древесного полукокса в смеси соответственно).

Связано это, в первую очередь, с возросшей реакционной способностью смесового топлива из-за увеличения в нем доли полукокса с относительно высоким содержанием кислорода (таблица 1).

Для обоснования экологической эффективности использования древесного полукокса в смеси с полукоксом, полученным из антрацита, был проведен анализ газофазных продуктов термического разложения исследовавшихся топлив (CO , CO_2 и NO_x). Характерные профили газовых компонент представлены на рис. 4.

Анализ полученных профилей позволяет выявить значительное влияние полукокса из древесных опилок на характер образования газофазных продуктов горения. Так, увеличение доли

последней приводит к интенсификации образования диоксида и оксида углерода (рис. 5а и рис. 5б соответственно), что связано с практически двукратным увеличением соотношений Н/С и О/С образцов полукокса, полученных из древесных опилок к антрацитному полукоксу.

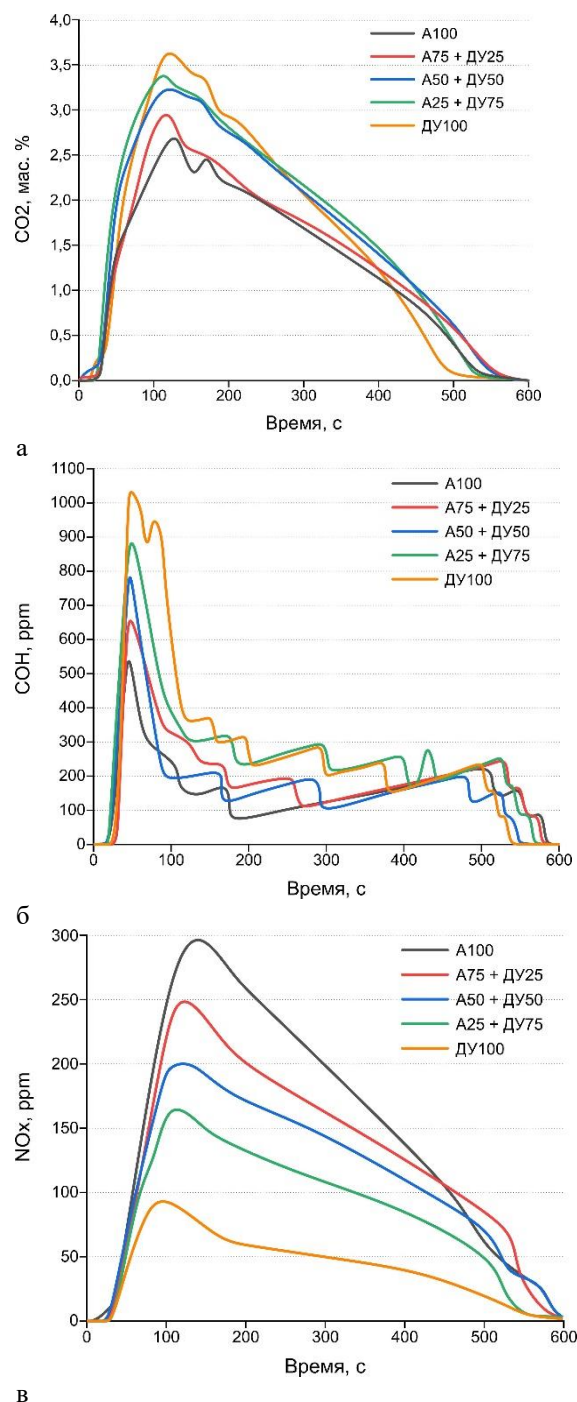


Рис. 4. Зависимости выделения газофазных продуктов горения (а – CO_2 , б – CO , в – NO_x) от времени процесса горения исследуемых образцов.

Напротив, согласно рис. 4в, очевидно, что рост концентрации биомассы в смеси приводит к

снижению образования оксидов азота в продуктах термического разложения данных топлив.

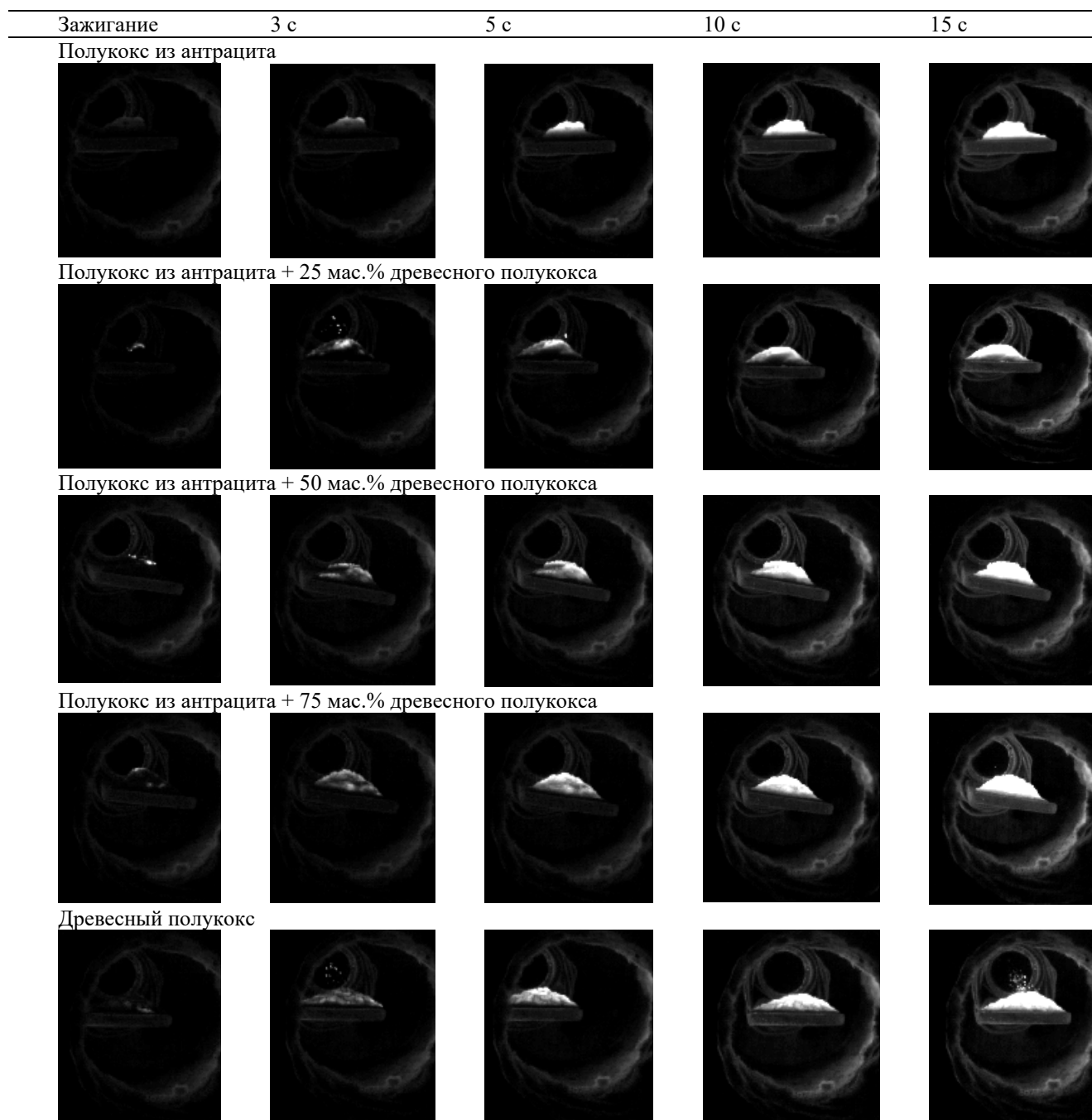


Рис. 5. Типичные кадры зажигания и горения смесевых топлив, полученные с помощью скоростной видеосъемки при $\tau_i = 700^\circ\text{C}$.

Причиной тому является то, что процесс интенсивного окисления топлива, содержащее в себе биомассу, смещается в низкотемпературную область, что в свою очередь снижает интенсивность образования термического азота. Таким образом, полученные профили находятся в хорошем согласии с техническим и термическим анализом исследовавшихся топлив.

Рассмотрим типичные кадры зажигания и развивающегося горения исследуемых топлив (рис. 5). Представленные кадры характеризуют этапы зажигания и развивающегося процесса горения исследуемых топлив: летучие частицы (преимущественно, органического происхождения) образуют вокруг топливной навески разогретое газовое облако, которое в свою очередь

прогревает топливную навеску, интенсифицируя устойчивое горение топлива.

Данный механизм интенсификации процесса воспламенения является типичным для смесевых топлив, основанных на низкореакционных углях (и их производных) и органических добавках в виде биомассы.

Относительные значения подынтегральных площадей под профилями газовых компонент представлены в таблице 3.

Таблица 3. Относительное значение подынтегральных площадей профилей, характеризующих выделение газообразных продуктов термического разложения топлив

Доля добавки древесины, мас. %	$S_{\text{mod}}/S_{\text{ref}}$		
	CO _n	CO ₂	NO _x
25	1,08	1,07	0,85
50	1,28	1,22	0,75
75	1,69	1,28	0,56
100	1,76	1,31	0,28

S_{ref} – полукокс, полученный из антрацита;

S_{mod} – топливный композит на его основе

Согласно данным таблицы 3 отметим, что добавление 25 мас. % полукокса древесных опилок необходимо и достаточно для получения топлива со сниженным содержанием в дымовых газах оксидов азота без существенного увеличения оксидов углерода, пусть и углерод-нейтрального происхождения.

Заключение

В работе исследованы физико-энергетические свойства смесевых топлив на основе полукокса, полученных из антрацита и древесных опилок, определены технические и термические характеристики, свойства горения таких смесей и состав газофазных продуктов их термического разложения.

Установлено, что формирование смесевых топлив на основе вышеуказанных компонент приводит увеличению реакционной способности антрацита, что выражено в смещении процесса интенсивного окисления в низкотемпературную область и снижении времени задержки зажигания таких топлив от 41 до 60 % относительно базового полукокса, полученного в результате пиролиза антрацита.

По данным газоанализа установлено, что увеличение доли биомассы в смеси приводит к увеличению концентрации углерод-нейтральных продуктов горения CO и CO₂ (в 1,07 и 1,69 раз), однако вместе с этим достигается снижение концентрации оксидов азота практически в 2

раза (при доли биомассы в смеси 75 мас. %) в результате интенсификации процесса окисления и, как следствие, уменьшении образования термического азота.

Финансирование работы

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты № 075-03-2021-138/3 FZES-2021-0008) и № 075-00268-20-02 (FSME-2020-0040)).

Список литературы

1. BPstats. BP Statistical Review of World Energy // BP Statistical Review of World Energy. British Petroleum, 2022. 1–60 p.
2. Department S.R. Distribution of electricity generation worldwide in 2021, by energy source [Электронный ресурс] // Statista. 2021. URL: <https://www.statista.com/statistics/269811/world-electricity-production-by-energy-source/> (Дата обращения: 22.02.2023).
3. IEA. Net Zero by 2050 // Net Zero by 2050. OECD, 2021.
4. Tarazanov I.G., Gubanov D.A. Результаты угольной промышленности за январь-декабрь, 2020 // Уголь. 2021. № 03. с. 27–43.
5. Guo F., Zhong Z. Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging // Environmental Pollution. Elsevier, 2018. Vol. 239. P. 21–29.
6. Gong X., Guo Z., Wang Z. Reactivity of pulverized coals during combustion catalyzed by CeO₂ and Fe₂O₃ // Combustion and Flame. Elsevier, 2010. Vol. 157, № 2. P. 351–356.
7. Li S., Chen G. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures // Waste Management. Elsevier, 2018. Vol. 78. P. 198–207.
8. Srivastava R.K., Shetti N.P., Reddy K.R., Kwon E.E., Nadagouda M.N., Aminabhavi T.M. Biomass utilization and production of biofuels from carbon neutral materials // Environmental Pollution. Elsevier, 2021. Vol. 276. P. 116731.
9. Larionov K.B., Mishakov I. V., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Kaltaev A.Z., Slyusarskiy K. V., Ruban A.S., Vedyagin A.A. Activation of anthracite combustion by copper acetate: mechanism, effect of particle size and introduction method // International Journal of Coal Science & Technology. Springer International Publishing AG, 2023. Vol. 10, № 1. P. 13.
10. Larionov K.B., Kaltaev A.Z., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Zenkov A.V., Slyusarskiy K.V. Activation of Combustion Process of Anthracite by Metal Nitrates // Combustion Science and

Technology. Taylor & Francis, 2022. P. 1-20.

References

1. BPstats. BP Statistical Review of World Energy // BP Statistical Review of World Energy. British Petroleum, 2022. 1–60 p.
2. Department S.R. Distribution of electricity generation worldwide in 2021, by energy source [Электронный ресурс] // Statista. 2021. URL: <https://www.statista.com/statistics/269811/world-electricity-production-by-energy-source/> (Дата обращения: 22.02.2023).
3. IEA. Net Zero by 2050 // Net Zero by 2050. OECD, 2021.
4. Tarazanov I.G., Gubanov D.A. RUSSIA'S COAL INDUSTRY PERFORMANCE FOR JANUARY – DECEMBER, 2020 // Ugol'. 2021. № 03. P. 27–43.
5. Guo F., Zhong Z. Co-combustion of anthracite coal and wood pellets: Thermodynamic analysis, combustion efficiency, pollutant emissions and ash slagging // Environmental Pollution. Elsevier, 2018. Vol. 239. P. 21–29.
6. Gong X., Guo Z., Wang Z. Reactivity of pulverized coals during combustion catalyzed by CeO₂ and Fe₂O₃ // Combustion and Flame. Elsevier, 2010. Vol. 157, № 2. P. 351–356.
7. Li S., Chen G. Thermogravimetric, thermochemical, and infrared spectral characterization of feedstocks and biochar derived at different pyrolysis temperatures // Waste Management. Elsevier, 2018. Vol. 78. P. 198–207.
8. Srivastava R.K., Shetti N.P., Reddy K.R., Kwon E.E., Nadagouda M.N., Aminabhavi T.M. Biomass utilization and production of biofuels from carbon neutral materials // Environmental Pollution. Elsevier, 2021. Vol. 276. P. 116731.
9. Larionov K.B., Mishakov I. V., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Kaltaev A.Z., Slyusarskiy K. V., Ruban A.S., Vedyagin A.A. Activation of anthracite combustion by copper acetate: mechanism, effect of particle size and introduction method // International Journal of Coal Science & Technology. Springer International Publishing AG, 2023. Vol. 10, № 1. P. 13.
10. Larionov K.B., Kaltaev A.Z., Berezikov N.I., Gorshkov A.S., Zenkov A.V., Slyusarskiy K.V. Activation of Combustion Process of Anthracite by Metal Nitrates // Combustion Science and Technology. Taylor & Francis, 2022. P. 1-20.

УДК 544.723.212

Сорбционные свойства диоксида кремния, полученного на основе вскрышных пород

В.А. Турянский

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, morsavinv@bk.ru

Статья поступила 25.04.2023 г.; после доработки 26.04.2023 г.

Аннотация

В работе представлены результаты исследования сорбционных свойств диоксида кремния на основе вскрышных пород. Технология производства данного сорбента разработана в НОЦ «Перспективные технологии и материалы». В качестве сорбата использовался метиленовый синий, являющийся органическим основным тизановым красителем. Исследования включали изучение кривой сорбции по времени, определение сорбционной емкости диоксида кремния при обычных условиях, исследование влияния на сорбцию температуры, pH, скорости перемешивания, массы навески. Определена максимальная сорбционная емкость SiO_2 , которая составила 438,22 мкмоль/г (140,1 мг/г). Оценена возможность регенерации диоксида кремния и его эффективность при повторном использовании.

Ключевые слова: диоксид кремния, карьерные отвалы, субмикронный порошок, агломерат

Sorption properties of silicon dioxide derived from overburden rocks

V.A. Turyansky

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya St., Sevastopol, Russia,
morsavinv@bk.ru

Received 25.04.2023 y.; received in final form 26.04.2023 y.

Abstract

The paper presents the results of the study of sorption properties of silicon dioxide on the basis of overburden rocks. The technology of production of this sorbent was developed in the SRC "Perspective technologies and materials". Methylene blue, which is an organic basic tizian dye, was used as a sorbate. The studies included a study of the sorption curve in time, determination of the sorption capacity of silica under normal conditions, investigation of the effect of factors on sorption: temperature, pH, stirring speed, weight of the sample. Maximum sorption capacity of SiO_2 was determined and amounted to 438,22 $\mu\text{mol/g}$ (140,1 mg/g). The possibility of silica regeneration and its efficiency for reuse has been evaluated.

Keywords: silicon dioxide, quarry dumps, submicron powder, agglomerate

Введение

Красители и пигменты – это природные и ксенобиотические соединения, способные поглощать и преобразовывать электромагнитное излучение (ЭМИ) в видимую область спектра. Пропитывая окрашиваемый материал, они придают ему свой оттенок. Одним из таких красителей является метиленовый синий, который используется при окраске бумаги, шелка, шерсти, в

производстве антисептических средств. В процессе протекания различных технологических процессов образуется большое количество токсичных сточных вод, что негативно сказывается на окружающей среде. Проблемы производств прежде всего связаны с образованием больших объемов сточных вод, требующих очистки. Удельное потребление воды на отделку тонны текстильных материалов в среднем составляет

около 100 м³. Возможность очистки и повторного использования вод, непосредственно на предприятиях текстильной и других промышленности, существенно снизило бы как расход вод, так и загрязнение окружающей среды.

Основные способы очистки сточных вод лакокрасочных предприятий (например, механический метод) [1], не являются энергоэффективными, поэтому актуальной задачей является поиск рациональных методов очистки стоков и их совершенствование.

Среди таких методов можно выделить метод коагуляции [2-4], метод реагентной флотации [5-8], электрокоагуляции [9-11]. Однако каждый из них обладает своими достоинствами и недостатками. Метод коагуляции с последующей фильтрацией отличается большими объемами получающегося осадка, сложностью его обработки и складирования, увеличением степени минерализации обрабатываемой сточной воды. Среди недостатков метода флотации можно выделить: загрязнение пор, сложности в выборе мелкопористых материалов, которые могут обеспечить образование небольших и одинаковых по диаметру пузырьков [12]. Метод электрокоагуляции как способ очистки сточных и оборотных вод показывает хорошие результаты. Однако, пока эта технология не находит широкого применения. Это связано с недостаточной производительностью, чрезмерным энергопотреблением, повышенным износом оборудования и уязвимостью установок [13].

Одним из методов водоочистки также является сорбция [14], позволяющая очищать воду от тяжелых металлов [15], хлорорганических веществ [16], фенолов, нефтепродуктов [17], синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ) [18], пестицидов. Разработанный в автором способ позволяет синтезировать диоксид кремния из вскрышных пород и карьерных отвалов. Полученный продукт обладает сорбционными свойствами, которые и анализируются в данной работе на примере органического красителя – метиленового синего.

Цель исследования состояла в оценке эффективности использования диоксида кремния в качестве сорбента для удаления красителей из окрашенных сточных вод на примере метиленового синего и определении оптимальных условий сорбции.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы задачи исследования:

- провести всесторонний анализ сорбционных свойств диоксида кремния, включая анализ исходного сырья, технологическую

схему приготовления, определение распределения частиц по размерам, микрофотографии на электронном микроскопе, элементный анализ, определение насыпной плотности и рентгенодифракционный анализ степени аморфности;

- изучить кинетику сорбции метиленового синего в качестве модельного раствора окрашенных сточных вод и определить оптимальное время сорбции;
- определить максимальную сорбционную емкость диоксида кремния для метиленового синего;
- определить наиболее эффективную дозу сорбента при различных массах навесок диоксида кремния;
- проанализировать полученные данные и сделать вывод об эффективности использования диоксида кремния в процессе сорбции метиленового синего.

Объектом исследования послужил диоксид кремния, используемый в качестве сорбента для удаления метиленового синего из окрашенных сточных вод.

Предмет исследования – сорбционные свойства диоксида кремния, включая определение оптимальных условий сорбции, эффективной дозы сорбента, а также изучение кинетики сорбции метиленового синего в качестве модельного раствора окрашенных сточных вод.

Материалы и методы исследования

Использованный в данной работе сорбент был получен на основе сырья (вскрышных отвалов) из карьерных отвалов Псилерахского месторождения (г. Севастополь). Пробы отвалов отбирались согласно ГОСТ 17.4.4.02-2017.

Элементный состав пробы, на основе которой получен сорбент, проводился на аналитическом комплексе на базе вакуумного рентгенофлуоресцентного кристалл-дифракционного сканирующего спектрометра ООО «НПО «СПЕКТРОН» Россия. Состав проб представлен в таблице 1.

Технология получения порошка диоксида кремния из карьерных отвалов включала несколько основных этапов (рис. 1).

Используемое сырье предварительно измельчали до фракции с диаметром частиц менее 10 мкм (2). После чего измельченное сырье подвергали обжигу при температуре 600-900 °С в течение 1,5-2 часов (3). При этом при температуре выше 600 °С разлагается органика, а при достижении 900 °С и последующим охлаждении ниже

точки Кюри, присутствующие оксиды железа становятся ферромагнетиками, благодаря чему железо становится возможным удалить магнитным сепаратором. Обработка магнитным сепаратором происходила при магнитной индукции в 0,15 Тл (4). В результате пробу разделяли на породу и магнитную фракцию железа (5). Полученную породу обрабатывали щелочью NaOH (6). Выщелачивание диоксида кремния проводили при постоянной температуре в 110-130 °С в течение 4 часов (7). Далее образованную пульпу фильтровали (8) с получением раствора жидкого стекла и отдельно нерастворимого осадка (9). Отфильтрованное жидкое стекло обрабатывали углекислым калием (10) для осаждения из раствора примесей (11). Раствор вновь фильтровали, после чего проводили осаждение диоксида кремния серной кислотой (14). Осаждение вели в 4 этапа вплоть до нейтральной реакции среды при постоянном перемешивании (12). На первом этапе pH раствора довели до 12 добавлением серной кислоты. После чего раствор жидкого стекла выдерживали в течение 15 минут. Затем добавляли кислоту до установления pH в пределах 10. Раствор вновь выдерживали в течение 15 минут. Далее следовал последний этап осаждения кислотой до нейтральной реакции среды. После каждого этапа осаждения кислотой, в раствор дополнительно вводили 10% дистиллированной воды от общего объема раствора. В ре-

зультате взаимодействия серной кислоты и силиката натрия происходило выпадение диоксида кремния в осадок (15). Образовавшийся диоксид кремния отделяли на фильтре (16). Полученный раствор солей натрия (17) при обезвоживании может использоваться как побочный продукт. Полученный диоксид кремния с объемом дистиллированной воды обрабатывали в кавитационном механизме для снижения площади поверхности частиц диоксида кремния (19). Далее диоксид кремния промывали (20) в 5% растворе азотной кислоты, а после в дистиллированной воде (21). После промывания диоксид кремния сушили в течении часа при температуре 120 °С (22).

Таблица 1. Состав вскрышных пород

Аналит	Значение, %	Аналит	Значение, мг/кг
MgO	1,953	MnO	1344,814
Al ₂ O ₃	3,775	V	140,637
SiO ₂	52,286	Co	18,891
P ₂ O ₅	0,081	Ni	73,858
K ₂ O	2,852	Cu	58,984
CaO	6,972	Zn	134,052
TiO ₂	0,800	As	2,347
Fe ₂ O ₃	3,069	Sr	231,693

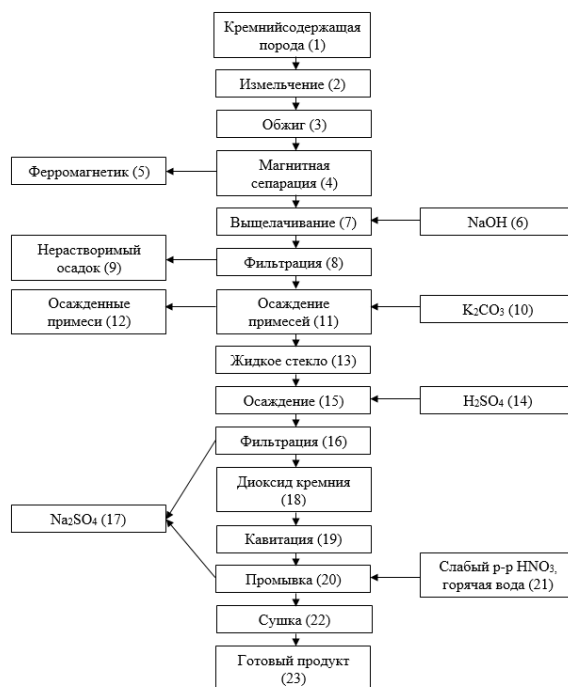


Рис. 1. Основные этапы производства диоксида кремния из карьерных отвалов.

Распределение размера частиц полученного диоксида кремния (рис. 2) определялся на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX фирмы: Phenom–World B.V. (Нидерланды)

с интегрированной системой энергодисперсионного анализа. Максимальное увеличение 150000, разрешение 10 нм, ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ.

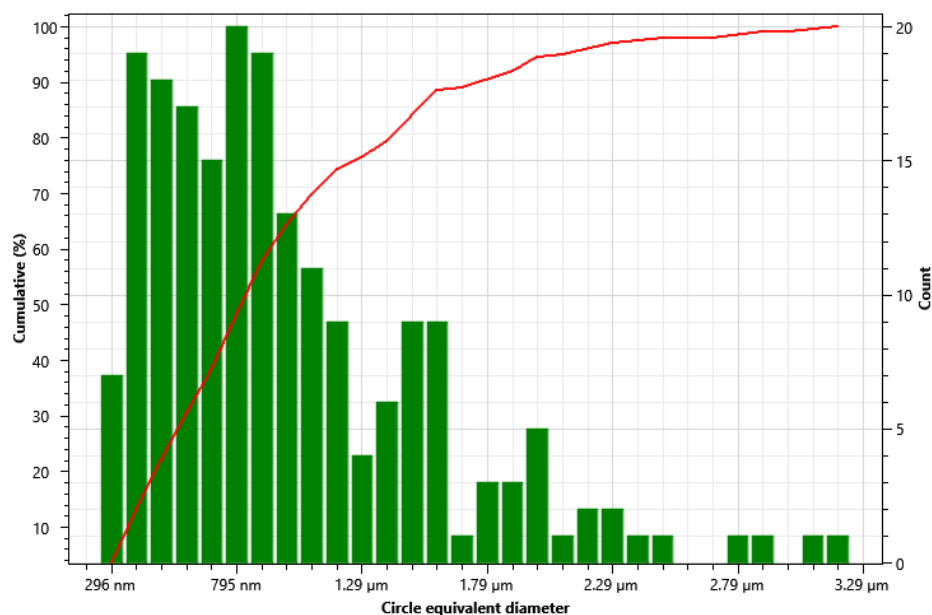


Рис. 2. Распределение частиц порошка SiO₂ по размерам

Элементный анализ исследуемых порошков получен с применением программы Element Identification компании Phenom, позволяющей использовать электронный микроскоп Phenom ProX для анализа образцов методом энергодисперсионного спектроскопии (рис. 3). Для анализа размера, формы и морфологии частиц использовали программное обеспечение Particle

Metric, позволяющее анализировать изображения частиц.

На представленном рисунке видны характерные для кремния и кислорода пики. Пиков, характерных другим элементам не наблюдается, что свидетельствует об отсутствии примесей.

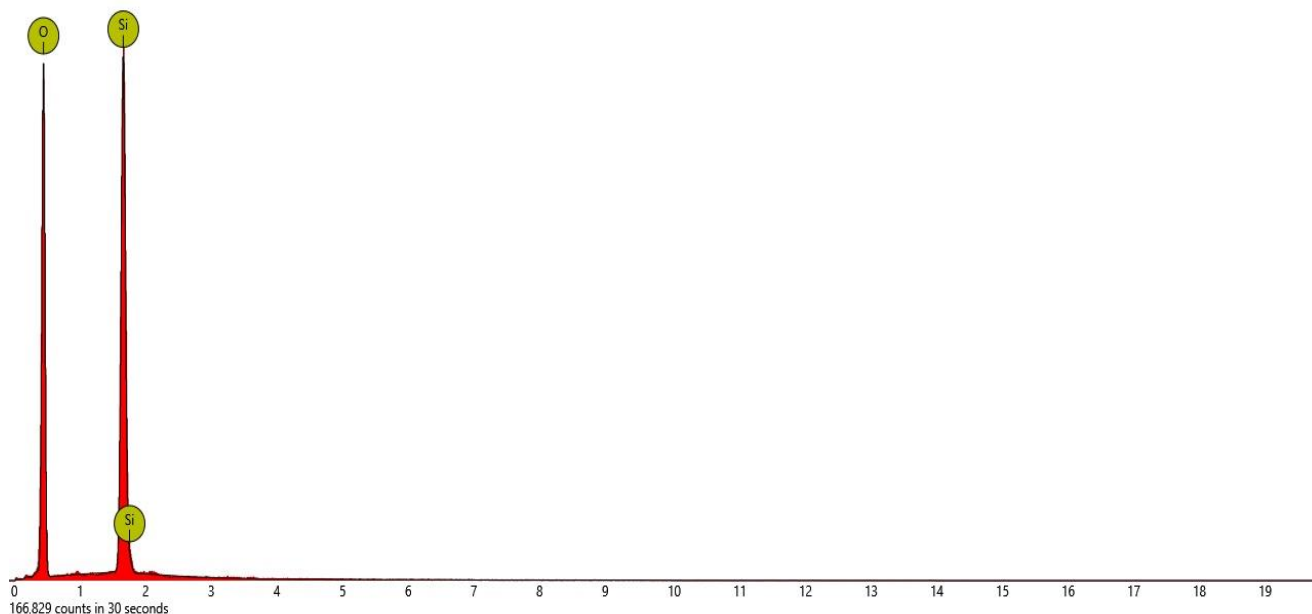
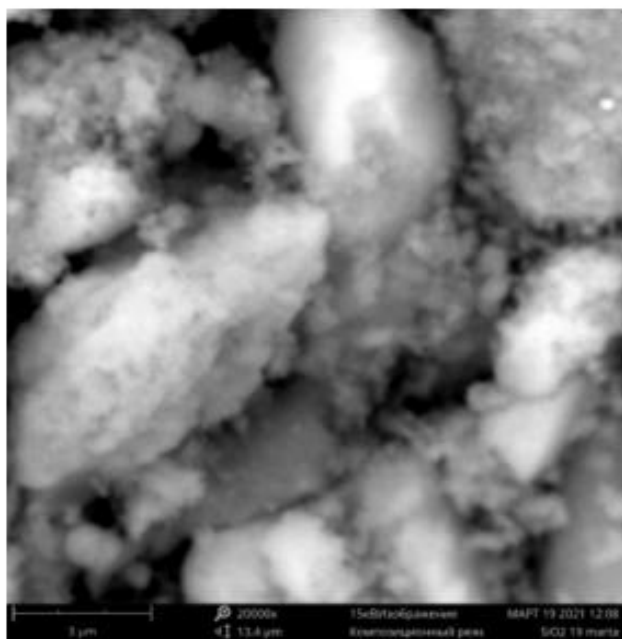


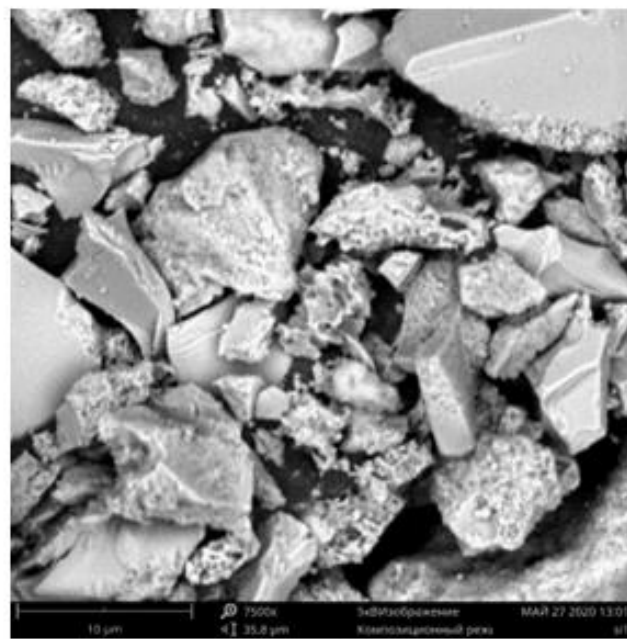
Рис. 3. Элементный анализ диоксида кремния

Для анализа размера, формы и морфологии частиц использовали программное обеспечение Particle Metric, позволяющее анализировать изображения частиц (рис. 4). Для сравнения также представлено изображение частиц диоксида кремния, получаемого способом, используемым в ранних работах [19] (рис. 5). На полученных с помощью электронного микроскопа изображениях диоксида кремния видно, что в первом случае диоксид кремния представлен расслоившимися частицами, не имеющими четких граней. В тоже время, диоксид кремния, полученный другим методом, имеет четко выраженную

структуру, представляющую монолитные, пористые обломки. Исходя из полученных данных о распределении размера частиц и микрофотографий диоксида кремния, можно сделать вывод, что используемый диоксид кремния обладает сильно развитой удельной поверхностью (малые размеры частиц и отсутствие точных форм). Удельная площадь поверхности адсорбентов является их наиболее важной характеристикой, так как именно от площади поверхности зависят их сорбционные свойства.



А)



Б)

Рис. 4. Микрофотография частиц: А) используемого диоксида кремния; Б) диоксида кремния, полученного ранее исследованным способом

Насыпная плотность диоксида кремния определялась согласно ГОСТ 8735-88 (табл 2).

Таблица 2. Определение насыпной плотности диоксида кремния.

Масса образца с емкостью, г	Масса емкости, г	Масса образца, г	Объем емкости, см ³	Насыпная плотность, г/см ³	Средняя, кг/м ³
44,85	25,44	7,612	40	0,1903	191,1
44,96		7,655		0,1914	
45,01		7,662		0,1916	

Дифракционная картина рассеяния рентге-

новского излучения в широких углах на кристаллических полимерных объектах определяется наличием в них в первом приближении двух фаз, кристаллической и аморфной, что проявляется на рентгенограмме в виде суперпозиции дискретных рефлексов и аморфного гало.

Для определения степени аморфности использовался рентгенодифракционный анализ поликристаллических веществ (рис. 6). Дифрактограмма представлена одним пиком. Наблюдается ярко выраженное аморфное гало 4,013 Å при угле Брэгга 21-22 °.

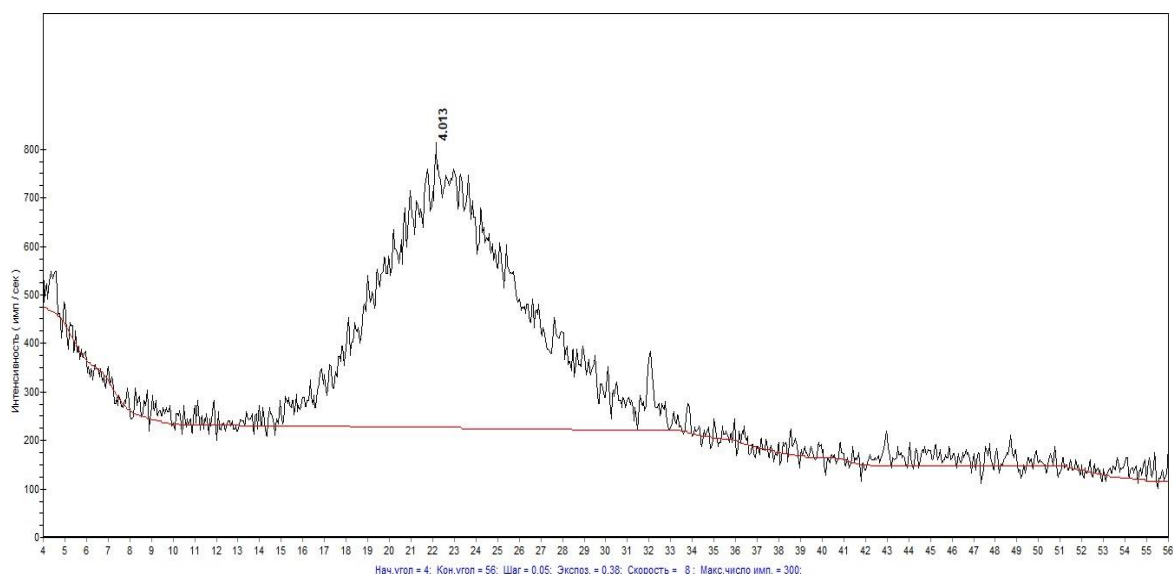


Рис. 5. Дифрактограмма используемого сорбента.

Имеющаяся в картотеке дифрактограмма поликристаллического диоксида кремния имеет

иной вид (рис. 7).

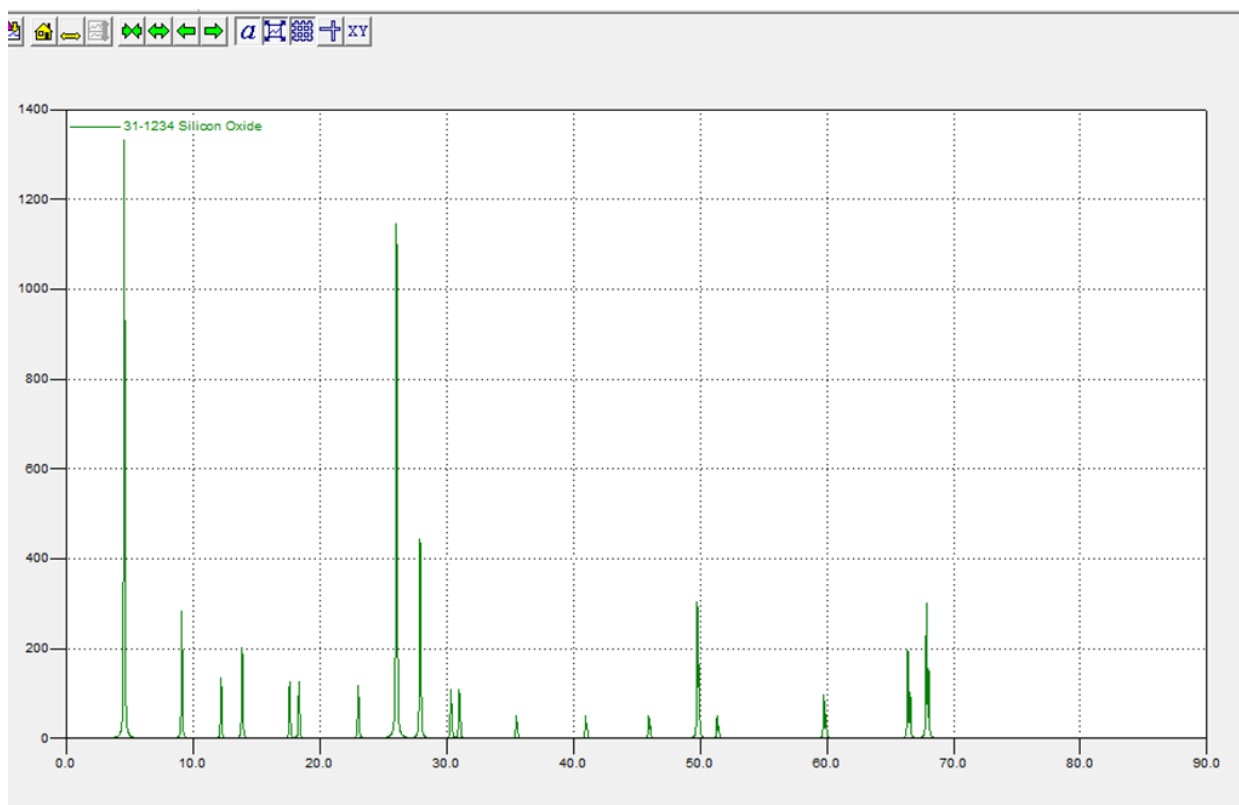


Рис. 6. Дифрактограмма поликристаллического диоксида кремния из картотеки

Исходя из того, что в используемом сорбенте наблюдается всего один пик, можно сделать вывод о высокой чистоте диоксида кремния. Аморфное гало 4,013 Å при угле Брэгга 21-22 ° свидетельствует об аморфности используемого сорбента.

В данном исследовании применялись следующие реактивы:

- Метиленовый синий (C₁₆H₁₈ClN₃S), чда (далее, МС);
- Вода дистиллированная, ГОСТ 6709-72

- Серная кислота (H_2SO_4) 95%, ГОСТ 4204-77
 - Натр едкий ($NaOH$) ТР 98,5%, ГОСТ Р 55064-2012
 - Диоксид кремния (SiO_2), (табл. 2).
- В работе использовалось оборудование:
- Магнитная мешалка Таглер ММ 135
 - Весы лабораторные «DEMCOM DL-103»
 - Фотометр «Эксперт – 003»
 - Центрифуга «СМ12»
 - Электрическая плитка «ПН-4030 Таглер»
 - Экстрактор «US-8000E»

- рН-метр-иономер «Эксперт-001-3»
- Муфельная печь «МП-2700»
- Сушильный шкаф
- Таймер

С целью определения концентраций МС в растворе после сорбции, был построен градуировочный график зависимости концентраций МС от оптической плотности. Используемые концентрации находились в пределах измерений фотометра: 3,13; 7,81; 15,64; 28,15; 46,9 мкмоль/дм³, что соответствует 1; 2,5; 5; 9; 15 мг/дм³ (рис.8).

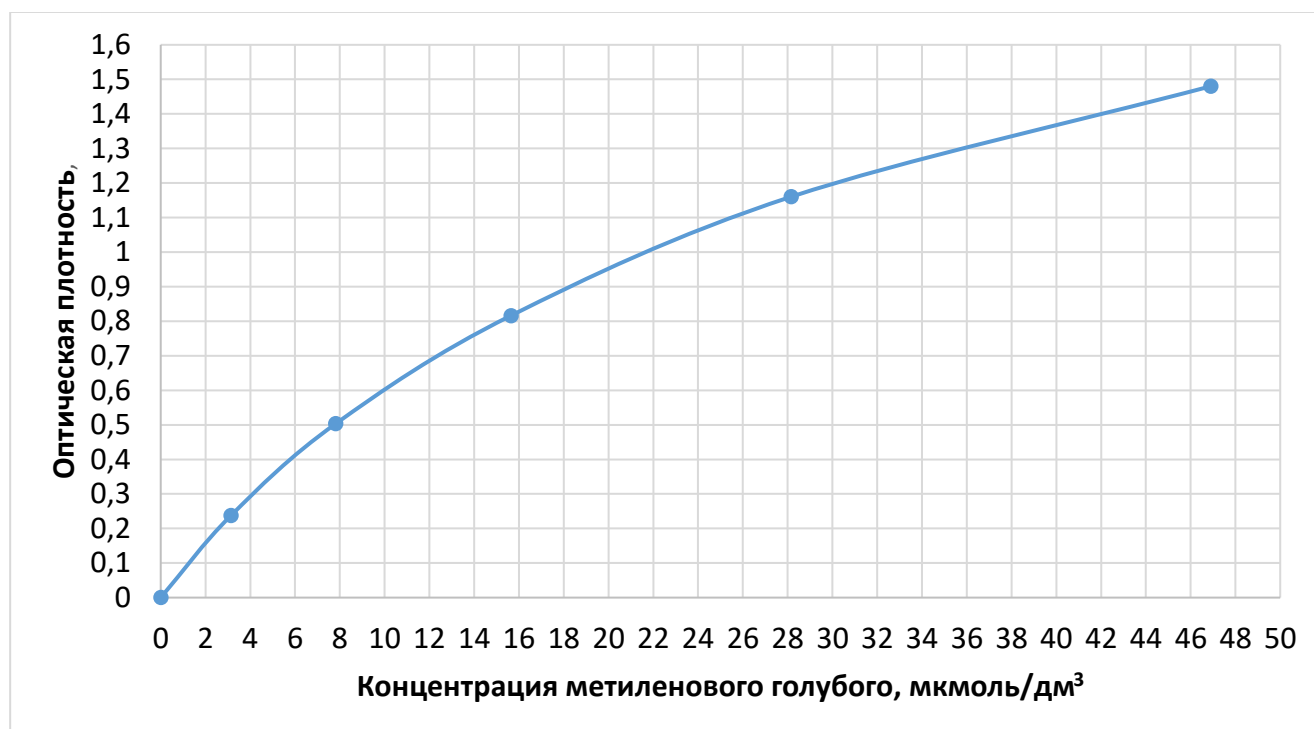


Рис. 7. Градуировочный график метиленового синего

Методология исследования

Общий ход эксперимента включает приготовление растворов определенной концентрации. Для этого навески метиленового синего с соответствующей массой разбавлялись в 1 дм³ дистиллированной воды и перемешивались на мешалке до полного растворения. Колбы с растворами обворачивали фольгой и оставляли на час перед использованием. Использование фольги необходимо для предотвращения взаимодействия МС и солнечного света, так как солнечный свет оказывает разрушающее действие на краситель, что может повлиять на конечный результат и создать погрешность. Далее в колбы емкостью 250 см³ приливали 200 см³ ранее приготовленного раствора МС. На весах для каждой

колбы с раствором готовилась навеска диоксида кремния определенной массы. Навески засыпали в колбы 250 см³ с растворами и помещали на магнитные мешалки. Скорость перемешивания раствора составляла 700 г/м. Через указанный промежуток времени из раствора отбирали пробы емкостью 20 см³ в пробирки для центрифуги. Использование центрифуги необходимо ввиду повышения оптической плотности при наличии частиц диоксида кремния в растворе, что искажает результаты работы. Скорость вращения центрифуги составляла 4500 г/м. Время работы – 30 мин. После центрифугирования, пробу помещали в кювету и производили замеры на фотометре. Также важной частью эксперимента было использование нового раствора для

каждого точки кривой в опыте, что связано с потерями навески диоксида кремния в ходе отбора пробы на центрифугу. Кроме того, для каждой точки производили по 3 замера для определения среднего значения. Полученные значения оптической плотности переводили в остаточную концентрацию МС по градуировочному графику. Имея значения оптической плотности исходных растворов МС и после сорбции, производился расчет массы МС, извлеченного диоксидом кремния. Далее производился пересчет на 1 г SiO_2 .

Для создания и оценки графика динамики сорбции использовались концентрации МС, находящиеся в пределах измерения фотометра: 3,13; 7,81; 15,64; 28,15; 46,9 мкмоль/дм³. Время контакта сорбента и сорбата составляли: 5; 10; 30; 60; 120; 240 мин. Навеска диоксида кремния равнялась 0,2 г на 200 см³ раствора. Таким образом концентрация SiO_2 в растворах равнялась 1 г/дм³. Данная концентрация обоснована простой пересчета в сорбционную емкость.

Для оценки сорбционной емкости диоксида кремния были приготовлены растворы МС концентрацией 468,6; 625,3; 781,3; 938,5 мкмоль/дм³. Выбор данных концентраций обоснован общей сорбционной емкостью, характерной данному сорбенту. Для диоксида кремния она начинается от 300 мкмоль/г. На весах взвешивали навески массой 0,2 г. Время сорбции составляло 5; 10; 30; 60; 120 мин. Время сорбции в 240 минут было исключено в виду отсутствия информативности этих данных.

Также в ходе экспериментов было проанализировано влияние массы навески сорбента на

эффективность сорбции. Для данного эксперимента был приготовлен раствор МС концентрацией 468,4 мкмоль/дм³. Использовались навески диоксида кремния массой 0,1; 0,2; 0,4 г. Такие массы равны концентрациям диоксида кремния 0,5; 1; 2 г/дм³ соответственно. Время сорбции составляло 5; 10; 30; 60; 120 мин.

Анализ полученных результатов исследования

Данные значений кривой сорбции от времени (рис. 9) позволяют увидеть кинетику сорбции МС. При этом на кривой можно выделить три основных области: резкий подъем кривой с начала сорбции до 5 мин (наиболее активный процесс сорбции); небольшое возрастание и постепенное падение с 5 мин до 60 мин, с максимумом во временном промежутке 30 мин (сорбционная активность небольшая, достигает своего максимума на 30 минутах, затем следует падение, что является началом процесса десорбции); едва заметное падение кривой с 60 до 240 минут (дальнейшее движение кривой – следствие десорбции и выравнивания в сторону равновесия концентраций). Таким образом, наиболее активно процесс наблюдается в течении первых 5 минут. При этом максимальное насыщение диоксида кремния ионами МС наблюдается через 30 минут после начала процесса сорбции. За ним следует процесс десорбции вплоть до достижения равновесной концентрации.

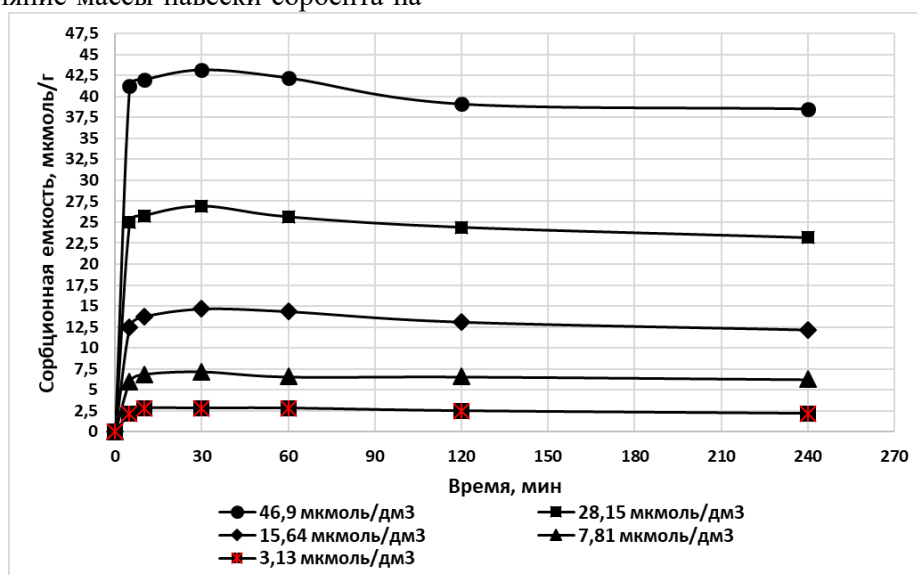


Рис. 8. График кинетики сорбции МС диоксидом кремния

Исходя из построенного графика (рис. 10), максимальная сорбционная емкость 1 г SiO_2 находится в пределах 438,22 мкмоль. При этом для ее достижения необходимо порядка 30 ми-

нут, после которых наблюдается повышение оптической плотности исследуемого раствора.

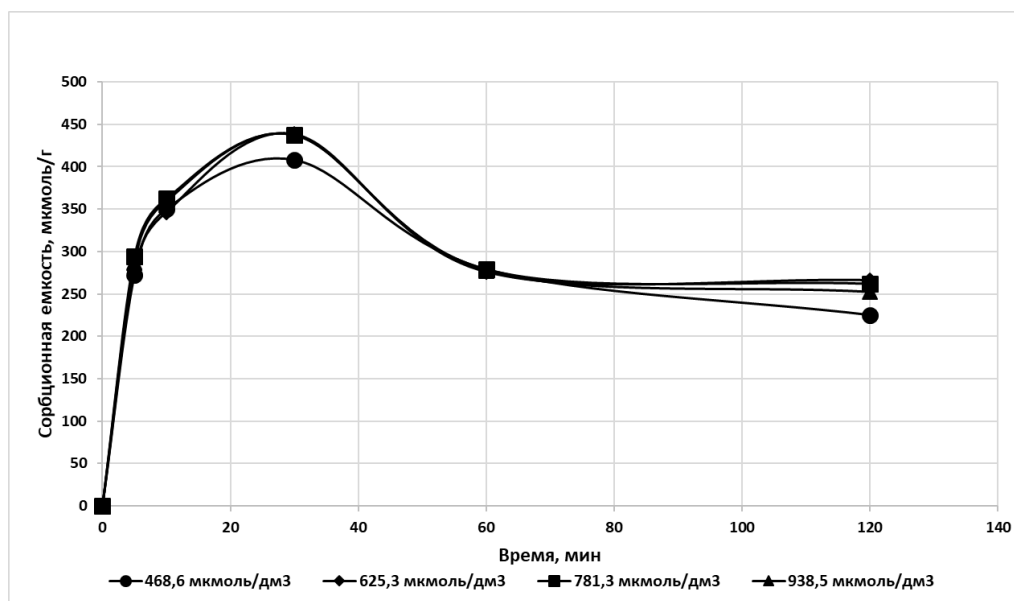


Рис. 9. Сорбционная емкость 1 г диоксида кремния при разных концентрациях МС

Представленные данные (рис. 11) позволяют сделать вывод о том, что прирост эффективности сорбции при увеличении массы навески не происходит. Увеличение массы навески позволило извлечь больше сорбата, однако эффективность, если пересчитывать на грамм, наоборот - снизилась. Кроме того, полностью извлечь МС сорбент не смог даже при уве-

личении массы в два раза, что связано с процессом десорбции.

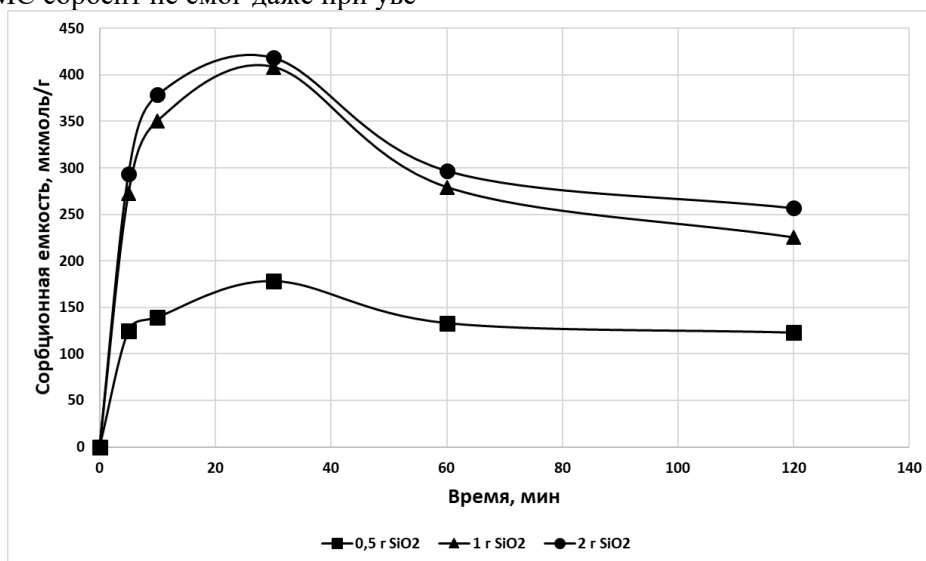


Рис. 10. Зависимость эффективности сорбции МС от массы навески диоксида кремния

На следующем графике (рис. 12) можно увидеть сравнение результатов сорбции за 30 минут (время максимальной эффективности сорбции). В данном случае при использовании 1 г SiO_2 поглощается 408,23 мкмоль МС. При использовании же 2 г поглощается 418,86 мкмоль, что на

2,6% больше. При этом 11,9% загрязнителя так и остались в растворе.

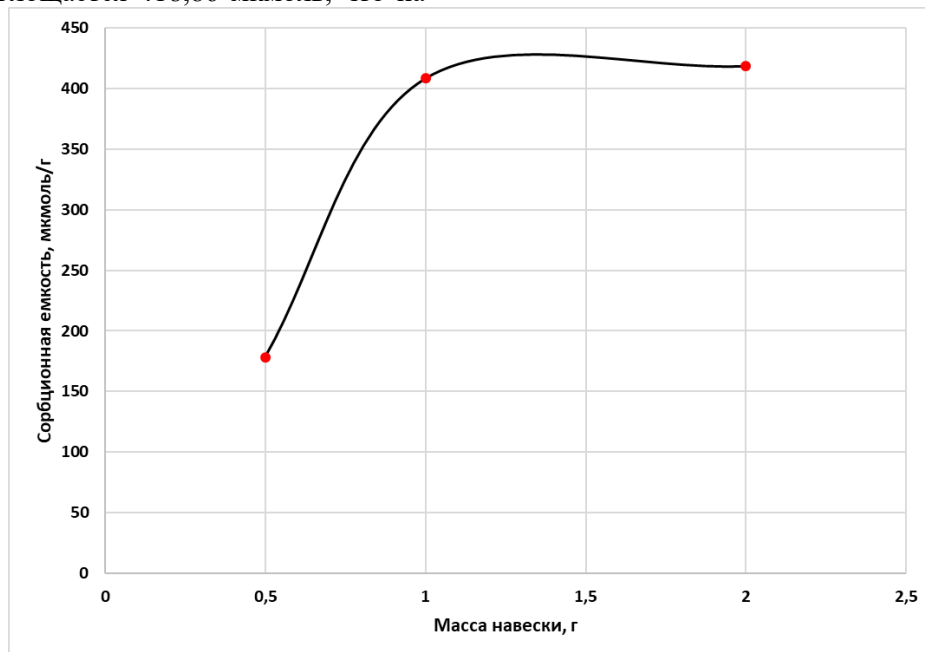


Рис. 11. Эффективность навесок диоксида кремния при сорбции за 30 минут

Заключение

Тематика исследования является актуальной, так как проблема загрязнения окружающей среды становится все более значимой в современном мире. Окрашенные сточные воды, содержащие органические загрязнители, такие как метиленовый синий, являются серьезной экологической проблемой. Использование диоксида кремния в качестве сорбента для удаления метиленового синего может представлять перспективное решение данной проблемы, особенно с учетом определения оптимальных условий сорбции и эффективной дозы сорбента.

В данной статье был проведен всесторонний анализ сорбционных свойств диоксида кремния, включающий анализ исходного сырья, представление технологической схемы приготовления диоксида кремния, определение распределения частиц по размерам, микрофотографии на электронном микроскопе, элементный анализ, определение насыпной плотности и рентгенодифракционный анализ степени аморфности. Кроме того, был проведен анализ кинетики сорбции метиленового синего в качестве модельного раствора окрашенных сточных вод.

Исследования позволили получить общее представление о процессе сорбции диоксидом кремния, включая определение оптимального времени сорбции, составившее 30 минут, и момента достижения равновесной концентрации при разных концентрациях метиленового синего. Равновесная концентрация наступала по истечении 30 минут, в связи с чем более длительный контакт с сорбентом будет снижать эффективность очистки. Была определена максимальная сорбционная емкость диоксида кремния, составившая 438,22 мкмоль/г (140,1 мг/г), с проведены исследования по определению сорбционной емкости разных масс навесок диоксида кремния при постоянной концентрации метиленового синего, что позволило определить наиболее эффективную дозу сорбента.

Таким образом, проведенный анализ сорбционных свойств диоксида кремния позволяет сделать вывод о его высокой эффективности в процессе сорбции метиленового синего, используемого в качестве модельного раствора окрашенных сточных вод. Полученные данные могут быть использованы для разработки новых мето-

дов очистки сточных вод от загрязнений и оптимизации процессов сорбции с использованием диоксида кремния.

Список литературы

1. Васильева К. В. Очистка сточных вод от лакокрасочного производства с помощью коагулянта и флокулянта / К. В. Васильев, Н. П. Нечитайло // Вісник ПДАБА. – 2009. – №5. – С. 35-38.
2. Горохова М. В. Реагентная очистка сточных вод процесса вторичной переработки пластических масс / М. В. Горохова, М. А. Байкова, Е. В. Костылева // Успехи в химии и химической технологии. – 2021. – №12. – С. 34-35.
3. Новомлинский М. О. Снижение воздействия на водные объекты загрязняющих веществ сточных вод / М. О. Новомлинский, О. Ю. Сартакова, А. А. Фогель, Л. Ф. Комарова // Ползуновский вестник. – 2014. – №3. – С. 202-205.
4. Гумеров Т. Ю. Процессы коагуляции при очистке сточных вод предприятий общественного питания / Т. Ю. Гумеров, О. А. Решетник // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – №5. – С. 233-235.
5. Перепелица Д. И. Использование эффекта сопутствующей флокуляции при очистке сточных вод от мелкодисперсных взвешенных частиц / Д. И. Перепелица, А. П. Лепихин, С. А. Лепешкин // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2021. – №6. – С. 126-141.
6. Шачнева Е. Ю. Исследование закономерностей очистки модельных систем сточных вод с применением флокулянта "водоканальный" / Е. Ю. Шачнева, В. Я. Хентов // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. – 2020. – №4. – С. 112-128.
7. Мазитова А. К. Исследование возможностей использования озона в качестве флокулянта / А. К. Мазитова, И. А. Сухарева, Г. К. Аминова, Г. М. Насырова, Е. А. Удалова, В. А. Сергеев // Башкирский химический журнал. – 2019. – №4. – С. 25-28.
8. Грязев В. Ю. Использование флокуляции для улучшения качества природных и сточных вод / В. Ю. Грязев, Л. Ф. Комарова // Ползуновский вестник. – 2004. – №2. – С. 127-131.
9. Авалбаев Г. А. Влияние pH буровых сточных вод на их очистку электрокоагуляцией / Г. А. Авалбаев, Ш. М. Кодиров // Universum: технические науки. – 2020. – №11-3 (80). – С. 22-24.
10. Шамсутдинова З. Р. Применение электрокоагуляции в очистке сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий // З. Р. Шамсутдинова, О. Р. Каратаев // Science Time. – 2015. – №12 (24). – С. 840-845.
11. Ткачев Р. Ю. Исследование электрокоагуляционной установки очистки сточных вод как объекта автоматизации / Р. Ю. Ткачев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – №10 (60). – С. 48-51.
12. Золотов А. В. Флотация и её применение для очистки сточных вод // А. В. Золотов, В. А. Лисовский, И. С. Багреева, Е. В. Слепова, Р. А. Ефременко // Science Time. – 2016. – №12 (36). – С. 266-274.
13. Филатова Е. Г. Обзор технологий очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов, основанных на физико-химических процессах / Е. Г. Филатова // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. – 2015. – №2 (13). – С. 97-109.
14. Котомцев В. В. Сорбция тяжёлых металлов при очистке сточных вод / В. В. Котомцев, М. Э. Буряев, Л. П. Луцкая // АВУ. – 2010. – №11-2 (77). – С. 28.
15. Собгайда Н. А. Влияние модифицирования шелухи пшеницы на ее сорбционные свойства к ионам Pb²⁺, Cd²⁺, Zn²⁺ и Cu²⁺ / Н. А. Собгайда, Л. Н. Ольшанская, Ю. А. Макарова // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2010. – №11. – С. 36-40.
16. Обуздина М.В. Решение проблемы утилизации хлорорганических отходов путем создания сорбционных материалов для очистки сточных вод с достижением эколого-экономического эффекта применяемых технологий / М. В. Обуздина, Е. А. Руш // Sciences of Europe. – 2021. – №66-1. – С. 47-54.
17. Дремичева Е.С. Механизм адсорбционной очистки сточных вод от эмульгированных нефтепродуктов / Е. С. Дремичева // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. – 2022. – №3. – С. 73-88.
18. Еремина А. О. Углеродные материалы из отходов лиственницы сибирской и коры пихты сибирской при сорбции органических поллютантов из водных растворов / А. О. Еремина, А. В. Рудковский, А. А. Соболев, О. П. Таран, Н. В. Чесноков // Вестник Томского государственного университета. Химия. – 2019. – №14. – С. 65-78.
19. Баранов Г. А. Исследования диоксида кремния микронного и субмикронного размера из отходов карьерного производства, полученного методом осаждения / Г. А. Баранов, В. А. Турянский, В. М. Гавриш, Т. В. Чайка, Н. М. Дербасова, О. П. Гавриш // Перспективные технологии и материалы : Материалы научно-практической конференции с международным участием, Севастополь, 14–16 октября 2020 года. – Севастополь: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Севастопольский государственный университет", 2020. – С. 133-136.

References

1. Vasil`eva K. V., Nechitajlo N. P. Wastewater treatment from paint and varnish production with coagulant and flocculant. *Visnik PDABA*, 2009, №5, pp.

- 35-38. (In Russ.)
2. Goroxova M. V., Bajkova M. A., Kosty`leva E. V. Reagent wastewater treatment of plastic recycling process. *Uspehi v himii i himicheskoy tekhnologii*, 2021, №12, pp. 34-35. (In Russ.)
3. Novomlinskij M. O., Sartakova O. Yu., Fogel` A. A., Komarova L. F. Reducing the impact of wastewater pollutants on water bodies. *Polzunovskij vestnik*, 2014, №3, pp. 202-205. (In Russ.)
4. Gumerov T. Yu., Reshetnik O. A. Coagulation processes in wastewater treatment of catering enterprises. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015., №5, pp. 233-235. (In Russ.)
5. Perepelicz D. I., Lepixin A. P., Lepeshkin S. A. Using the effect of accompanying flocculation in wastewater treatment of fine suspended solids. *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2021, №6, pp. 126-141. (In Russ.)
6. Shachneva E. Yu., Xentov V. Ya. Study of regularities of wastewater treatment model systems with the use of flocculant "vodokanalny". *Vodnoe khozyajstvo Rossii: problemy, tekhnologii, upravlenie*, 2020, №4, pp. 112-128. (In Russ.)
7. Mazitova A. K., Suxareva I. A., Aminova G. K., Nasyrova G. M., Udalova E. A., Sergeev V. A. Study of the possibility of using ozone as a flocculant. *Bashkirskij himicheskij zhurnal*, 2019, №4, pp. 25-28. (In Russ.)
8. Gryazev V. Yu., Komarova L. F. Using flocculation to improve the quality of natural water and wastewater. *Polzunovskij vestnik*, 2004, №2, pp. 127-131. (In Russ.)
9. Avalbaev G. A., Kodirov Sh. M. Influence of pH of drilling waste water on its treatment by electrocoagulation. *Universum: tekhnicheskie nauki*, 2020, №11-3 (80), pp. 22-24. (In Russ.)
10. Shamsutdinova Z. R., Karataev O. R. Application of electrocoagulation in wastewater treatment at oil refineries. *Science Time*, 2015, №12 (24), pp. 840-845. (In Russ.)
11. Tkachev R. Yu. Study of electric coagulation unit for wastewater treatment as an object of automation. *Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovykh tekhnologii*, 2012, №10 (60), pp. 48-51. (In Russ.)
12. Zolotov A. V., Lisovskij V. A., Bagreeva I. S., Slepova E. V., Efremenko R. A. Flotation and its application to wastewater treatment. *Science Time*, 2016, №12 (36), pp. 266-274. (In Russ.)
13. Filatova E. G. Review of wastewater treatment technologies for heavy metal ions based on physical and chemical processes. *Izvestiya vuzov. Prikladnaya ximiya i biotekhnologiya*, 2015, №2 (13), pp. 97-109. (In Russ.)
14. Kotomcev V. V., Buraev M. E., Luczkaya L. P. Heavy metal sorption in wastewater treatment. *Agrarnyj vestnik Urala*, 2010, №11-2 (77), pp. 28. (In Russ.)
15. Sobgajda N. A., Olshanskaya L. N., Makarova Yu. A. Influence of modification of the husk of wheat on its sorption properties to Pb^{2+} , Cd^{2+} , Zn^{2+} and Cu^{2+} ions. *Izvestiya VUZov. Ximiya i ximicheskaya tekhnologiya*, 2010, №11, pp. 36-40. (In Russ.)
16. Obuzdina M.V., Rush E. A. Solving the problem of chlororganic waste disposal through the creation of sorbing materials for wastewater treatment in order to achieve the environmental and economic effect of the technologies used. *Sciences of Europe*, 2021, №66-1, pp. 47-54. (In Russ.)
17. Dremicheva E.S. Mechanism of adsorption treatment of wastewater from emulsified petroleum products. *Vestnik PNIPU. Ximicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya*, 2022, №3, pp. 73-88. (In Russ.)
18. Eremina A. O., Rudkovskij A. V., Sobolev A. A., Taran O. P., Chesnokov N. V. Carbon materials from waste Siberian leaf-veneer and Siberian fir bark in the sorption of organic pollutants from aqueous solutions. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Ximiya*, 2019, №14, pp. 65-78. (In Russ.)
19. Baranov G. A., Turyanskij V. A., Gavrish V. M., Chajka T. V., Derbasova N. M., Gavrish O. P. Studies of micron-sized and submicron-sized silicon dioxide from quarry waste obtained by precipitation. *Perspektivnye tekhnologii i materialy: Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodny'm uchastiem, Sevastopol*, 14-16 oktyabrya 2020 goda. – Sevastopol: Federal'noe gosudarstvennoe avtonomnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego obrazovaniya "Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet", 2020, pp. 133-136. (In Russ.)

УДК 66

Использование магнитного поля для очистки технологических сред

С.А.Федорова

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, .s.a.fedorova@sevsu.ru,

Статья поступила 25.04.2023 г.; после доработки 26.04.2023 г.

Аннотация

В статье рассмотрены типовые методы очистки воды на атомных станциях. Проанализированы особенности магнитной обработки воды. Для моделирования магнитного поля использован Магнитон 15 – Н. Приведены результаты экспериментального исследования по определению оптимального времени воздействия магнитного поля на модельный раствор сульфата кальция. Определено поведение хлоридов и карбонатов кальция модельных растворов в динамических условиях.

Ключевые слова: магнитная обработка воды, CaSO_4 , CaCl_2 , CaCO_3 .

Using the magnetic field to clean process media

Fedorova S.A.

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
s.a.fedorova@sevsu.ru,

Received 25.04.2023 y.; received in final form 26.04.2023 y.

Abstract

The article considers typical methods of water purification at nuclear power plants. The features of magnetic water treatment are analyzed. Magniton 15 – N was used to simulate the magnetic field. The results of an experimental study to determine the optimal time of magnetic field exposure to a model solution of calcium sulfate are presented. The behavior of calcium chlorides and carbonates of model solutions under dynamic conditions is determined.

Key words: magnetic water treatment, CaSO_4 , CaCl_2 , CaCO_3 .

Введение

На большинстве атомных станций в качестве охлаждающего элемента используется природная вода. вода из рек, озер или морей и океанов. А на одной из крупнейших атомных электростанций США – Пало-Верде, охлаждающая вода вообще используется из сточных вод[1]. Поэтому процесс водоподготовки воды для работы АЭС один из основополагающих.

Непосредственное использование природных вод для хозяйственно-бытовых нужд, в промышленности, в частности, в теплоэнергетики, как правило, неприемлемо. На

атомных станциях вода используется как рабочее тело и как теплоноситель. Эффективность передачи тепловой энергии и последующего ее превращения в механическую энергию, определяется чистотой контактирующих с водой и паром поверхностей металла. Различные отложения, которые образуются на теплопередающих поверхностях, приводит к ухудшению теплопередачи. Поэтому эффективность работы основного оборудования напрямую связана с концентрацией в питательной воде и добавочной воде растворенных и взвешенных веществ, а также агрессивных агентов, вызывающих коррозию металла. Поэтому, во-первых, следует удалять

примеси природных вод (грубодисперсное и коллоидное состояние), соли жесткости. Во-вторых, удаление растворенных в воде агентов коррозии

Современные методы очистки природных вод позволяют обеспечить выполнение вышеперечисленных условий, гарантирующих длительную безаварийную работу оборудования АЭС.

При выборе методов очистки природных вод необходимо учитывать фазово-дисперсное состояние и солесодержание очищаемых вод. Как правило при очистке вод используется последовательное использование методов очистки: сначала удаляются грубодисперсные примеси, затем коллоидно-дисперсные примеси и на последней стадии удаляются истинно-растворенные вещества[1].

Целью нашего исследования является анализ возможности использования магнитного поля для очистки технологической среды.

Типовые подходы для организации водоподготовки для атомных электростанций

На современных атомных электростанциях используется многоступенчатая система фильтрации, которая, отличается у разных АС, поскольку ориентирована на состояние исходного материала.

Так, для **Ленинградской АЭС-2** в Сосновом Бору для охлаждения контура реактора целесообразно использовать воду из Финского залива Балтийского моря. Для подготовки её пропускают через две ступени ультрафильтрации, две ступени обратного осмоса, мембранную дегазацию и очистку ионообменным фильтром.

На **Балаковской АЭС** для получения воды с целью хозяйственно питьевых служб пробурены две скважины. Однако ни в одной из них вода не соответствует параметрам СанПиН по показателям мутности, кислотности, жесткости и содержанию железа. Поэтому для обеих скважин была разработана многоступенчатая система водоподготовки для питьевых нужд, которая включает: фильтр грубой очистки, осадочные фильтры, станции солерастворения, систему умягчения воды и ультрафиолетовые стерилизаторы.

Похожую очистку проходит и вода, попадающая из контура обратно в водоем. Только воду в контуре постоянно очищают еще в момент циркуляции. Такую же работу проводят и с водами бассейнов выдержки, где хранится отработанное

ядерное топливо. Как правило, для этого используются механические фильтры, которые удаляют продукты коррозии и прочие загрязнения, и ионитовые фильтры, которые превращают воду в первоначальное состояние[1].

Очистка методом ионного обмена

Вода основных контуров АЭС очищается, в основном, от растворимых веществ; осуществляется эта обработка в виде очистки продувочной воды. Поскольку очистка производится методом ионного обмена, то температура воды перед установками снижается до 40—50 °С в специальных охладителях. Охлаждение продувочной воды приводит к безвозвратной потере тепла в количестве примерно 125 МДж на 1 м³ воды. Поэтому из экономических соображений при нормальной работе блока продувку снижают до уровня, обеспечивающего удаление из основного контура только растворимых солей. Продукты коррозии установкой очистки продувочной воды удаляются попутно и в основном в пусковой период, когда их концентрация в воде значительна.

Очистка воды с использованием Соосаждения

На рис. 1 представлена схема очистки воды с использованием соосаждения. Исходная вода накапливается в емкостях, как правило, в баках трапных вод и усредняется. При необходимости нейтрализуется добавлением кислоты или щелочи и подается в смеситель 2.

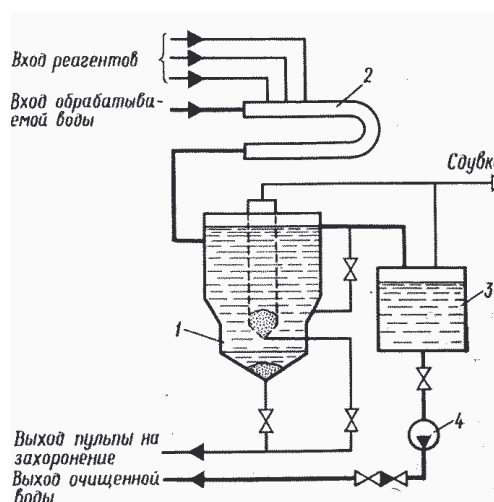


Рис.1. Схема очистки воды с использованием соосаждения

Смеситель представляет собой изогнутую

трубу, внутри которой установлены перегородки, создающие высокую турбулентность потока и, как следствие, хорошее перемешивание воды с реагентами. При использовании напорных осветлителей (отстойников) бак и насос не устанавливают, а вода подается на дальнейшую обработку за счет избыточного давления в осветлителе.

Очистка воды с использованием фильтрации

При фильтрации можно использовать намывные, угольные или ионитные фильтры.

Исходная вода подается на ионитные фильтры, включенные параллельно, которые работают либо совместно, либо поочередно. Фильтрующим материалом является чаще всего катионит КУ-2-8. Очищенная вода направляется на дальнейшую обработку, а загрязняющие вещества удаляются из фильтра при промывке. Для уплотнения фильтрующего материала после промывки в течение нескольких минут через него пропускают промывочную воду, которую затем сбрасывают в спецканализацию. При невозможности дальнейшего использования фильтрующего материала его удаляют пневмогидротранспортом на захоронение.

При использовании намывных фильтров исходная вода подается на намывные механические фильтры, которые работают поочередно. Фильтрующий материал, как правило, фильтроперлит, поступает как для первоначального намыва фильтрующего слоя, так и в процессе очистки воды в виде суспензии со специальной установки. Отработавший фильтрующий материал вместе с загрязнениями удаляется на захоронение. Очищенная вода при необходимости направляется на дальнейшую обработку, как правило, методом ионообмена.

Сорбционные угольные фильтры используют для очистки воды от органических примесей (в основном масел). Для получения более высокой степени очистки фильтры включают последовательно. Если содержание органических примесей невелико, то можно ограничиться одним фильтром. Поскольку сорбция масел активированным углем возрастает с повышением температуры, то на фильтры подается горячая вода, в основном дистиллят выпарных аппаратов. После фильтров температуру очищенной воды снижают в охладителе до 40—50°C, поскольку дальнейшую обработку ведут, как правило, на ионитных фильтрах.

Очистка воды с использованием дегазации и дистилляции

Подогретая примерно до 100°C вода в первом выпарном аппарате нагревается до кипения греющим паром и частично испаряется. Вторичный пар первого аппарата поступает в качестве греющего пара во второй выпарной аппарат и т.д. Вторичный пар последнего выпарного аппарата конденсируется в конденсаторе и сливается в деаэратор-дегазатор, куда поступает также конденсат греющего пара из предыдущих выпарных аппаратов. Кубовый остаток последовательно перетекает из первого выпарного аппарата во второй и третий, при этом упариваясь соответственно примерно в 1,5, 2 и 7 раз. Из последнего аппарата упаренный примерно в 20 раз концентрат направляется на захоронение.

В деаэраторе-дегазаторе вследствие снижения давления часть горячего конденсата испаряется. Часть пара совместно с выделившимися газами поступает в конденсатор. Конденсат возвращается в деаэратор, а газы удаляются через сдвудку в систему вытяжной спецвентиляции.

В отличие от многокорпусной установки в состав однокорпусной входит доупариватель, где дополнительно происходит упаривание кубового остатка выпарного аппарата. Концентрат доупаривателя направляется на захоронение, а при использовании на блоке борного регулирования — на регенерацию борной кислоты. Вторичный пар доупаривателя поступает в сепаратор выпарного аппарата, где проходит дополнительную очистку. Таким образом, доупариватель является второй ступенью испарения [1].

Использование осмоса для очистки воды

Установка очистки воды с использованием обратного осмоса состоит из отдельных блоков, в каждый из которых входят бачок, насос и мембранный аппарат. Для увеличения производительности установки блоки соединяются между собой параллельно, а для увеличения коэффициента очистки — последовательно. Число параллельно включенных блоков и последовательно включенных ступеней бывает различным и определяется производительностью установки, загрязненностью исходной воды и необходимой степенью очистки.

Предварительно очищенная от взвешенных частиц исходная вода подается в бачок первой ступени очистки и затем насосом прокачивается

через мембранный аппарат. Частично обессоленная вода поступает на вторую ступень очистки, после которой направляется на доочистку для дальнейшего использования в схемах АЭС.

Жидкость после мембранных аппаратов первой и второй ступеней, сконцентрированная примерно в 6 раз, поступает в отдельный аппарат, откуда после уменьшения объема еще в 2—3 раза направляется на дополнительное концентрирование в соответствии с технологической схемой [4].

Использование мембран для очистки воды

Сегодня наиболее передовые решения в водоподготовке осуществляются с применением мембранной технологии. С помощью мембран, которые пропускают воду и задерживают примеси, можно наиболее просто, экологично и эффективно изменять состав и свойства воды, добиваясь выполнения требований к чистоте продукта. С помощью мембранных процессов удастся охватить практически весь диапазон возникающих задач разделения: от самых тонких (глубокое обессоливание воды методом электродеионизации) – до относительно грубых (микрофильтрационная очистка жидкостей от взвешенных частиц субмикронных размеров). Современные мембранные процессы отличаются высокой селективностью, низкими энергозатратами, простотой аппаратного оформления, служат основой создания безотходных технологий. Так, при проектировании водоподготовительной установки (ВПУ) для АЭС «Белене» было принято решение использовать такие методы обработки воды как ультрафильтрация, обратный осмос, мембранная декарбонизация и электродеионизация. Комбинации этих методов хорошо зарекомендовали себя на атомных электростанциях во многих странах мира, так, например, технологии обратного осмоса и электродеионизации успешно внедрены в США на атомных электростанциях Grand Gulf Nuclear Station (Порт Гибсон), Cooper Nuclear Station (Небраска) и др. [5].

Магнитная обработка воды

Магнитная обработка воды – это воздействие на воду постоянным магнитным полем, при котором растворенные в воде ионы кальция, кремния и магния теряют свою способность к солеобразованию (накипи) на сорбирующих поверхностях. При этом нерастворимые соли нахо-

дятся во взвешенном состоянии, а уже существующие отложения разрыхляются и легко удаляются.

Соли кальция и магния, растворенные в воде, находятся в окружении кластеров (скопления молекул) воды. Если температура воды обычная (не выше 25°), ионы кальция и магния не вступают во взаимодействие с другими соединениями, и накипь в этих условиях не образуется. При кипячении воды сила притяжения молекул воды ослабевает, и кластеры распадаются на отдельные молекулы воды. Ионы кальция свободно вступают в связь, образуя нерастворимые в воде соединения (накипь). При обработке воды магнитным полем кластеры воды начинают разрушаться уже в холодной воде. Образуются так называемые центры кристаллизации или микрорекристаллы. Микрорекристаллы после подогрева остаются в воде в виде легко удаляемого осадка (шлама) и обычно скапливаются в специальных отстойниках. Кроме этого, уже имеющаяся накипь становится рыхлой и легко удаляется. [2-4].

Как отмечается в [2], при установке магнитных очистителей за несколько метров до бойлеров или паровых котлов **снижается количество накипи**, образуемой при нагревании; снижается количество реагентов, используемых для умягчения воды; **увеличивается скорость фильтрации**; очищаются от солей эксплуатируемые теплообменники (*без использования химических реагентов*); снижаются затраты на обслуживание систем очистки воды; за счет снижения коррозии **увеличивается срок службы** обогревательного оборудования.

Однако, при нагревании воды свыше 120° магнитные свойства элементов ослабевают. Кроме этого, магнитная обработка **не дает полную очистку воды**, она увеличивает эффективность использования классического метода очистки, например, при использовании мембран технологий.

Исследование влияния магнитного поля на модельные растворы карбоната, хлорида и сульфата кальция

Химически чистая вода является диамагнетиком и практически не способна к намагничиванию. Однако примеси воды могут в большей степени подвергаться воздействию магнитного поля. Основными действующими факторами здесь являются ориентация диполей вдоль линий магнитного поля и движения заряженных частиц

под действием силы Лоренца.

В дипломной работе Столярчука В.С. проводилось исследование влияния магнитного поля на растворы сульфата, хлорида и карбоната кальция. В качестве источника постоянного магнитного поля был выбран магнит марки Магнитон 15 – Н. Для определения влияния магнитного поля на модельный раствор сульфата кальция в зависимости от времени воздействия поля на исследуемый компонент. Раствор сульфата кальция готовили с концентрацией 0,001 М отталкиваясь от произведения растворимости ($IP_{CaSO_4} = 2,5 \cdot 10^{-5}$). Время воздействия магнитного поля соответственно составило 5, 10, 15, 20, 25, 30 минут. Каждые 5 минут отпирали 50 мл пробы. Комплексонометрически определяли объем титранта, пошедшего на титрование. Результаты представлены на рис.2.

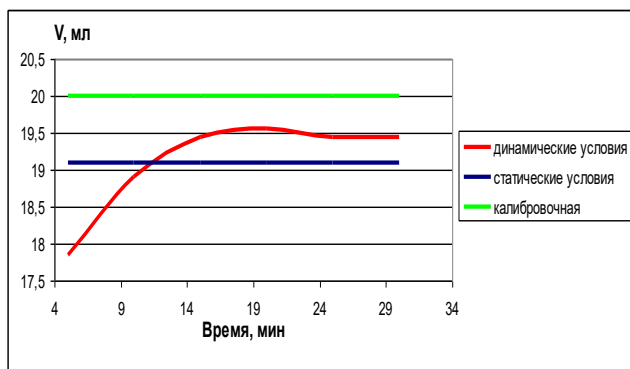


Рис. 2. Изменение содержания ионов кальция в модельном растворе при динамическом и статическом режимах

На титрование исходного модельного раствора сульфата кальция пошло 20 мл трилона Б (кривая 1). После прохождения раствора через Магнитон 15Н, в котором он фиксировано находился от 5 до 30 минут, концентрация содержания Ca^{2+} в центральной части потока (условия пробоотбора) изменилась, но была постоянна на протяжении всего времени (кривая 2). Максимальное отклонение содержания Ca^{2+} в модельном растворе наблюдается в динамических условиях (кривая 3). Причем, максимальное отклонение наблюдается в промежутке времени от 5 до 15 минут. Итак, руководясь полученными данными можно сделать вывод о том, что для дальнейшего исследования магнитного поля на растворы карбоната и хлорида кальция целесообразно выбрать время в интервале от 5 до 15 минут. Для исследования воздействия магнитного поля на хлорид и карбонат кальция были приготовлены модельные растворы хлорида кальция и

карбоната кальция с концентрацией 0,01 М. Так как хлорид кальция обладает хорошей растворимостью (растворимость хлорида кальция при температуре 200⁰С составляет 74.5 граммов на 100 граммов воды), был получен раствор с максимальной концентрацией модельного компонента Ca^{2+} . Была определена сравнительная характеристика зависимостей влияния магнитного поля на растворы карбоната и хлорида кальция. Количество содержащихся ионов Ca^{2+} в растворе устанавливалось методами объемного анализа: титрованием отфильтрованной через фильтр пробы раствора Трилоном – Б в присутствии индикатора – мурексида.

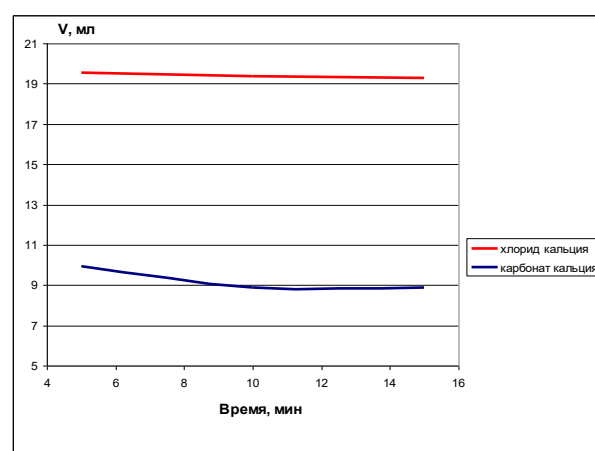


Рис.3. Сравнительная характеристика графических зависимостей карбоната и хлорида кальция

Таким образом, анализируя полученные результаты можно сказать, что растворы хлорида и карбоната кальция ведут себя приблизительно одинаково.

Выводы

Таким образом, магнитная обработка воды является перспективным направлением в процессе водоподготовки, что позволяет сделать процесс умягчения воды простым, надежным, доступным и экономичным, с срок службы оборудования и приборов практически бессрочным.

Обработка воды магнитным полем является альтернативой в использовании твердых и жидких ингибиторов в обратноосмотических системах. Целесообразно использовать в системах очистки, которые работают на основе мембран и ионообменных смол, где ресурс систем увеличивается на 30%. [2].

При наложении магнитного поля Магнитом 15М содержание ионов кальция в центральной части потока изменяется. Оптимальное

время воздействия поля 5- 15 минут. При динамических условиях оптимальный расход $6 \cdot 10^{-4}$ м³/час. Поведение анионов хлоридов и карбонатов кальция аналогично.

Список литературы

1. Как очищают воду аэс <https://coralreef-aqua.ru/kak-ochishchayut-vodu-aes/> (дата обращения 01.03.2023г)
2. Очистка воды магнитом <https://sistemyochistkivody.ru/magnitnaya-obrabotka-vodyi.html> (дата обращения 01.03.2023г) можно ли убрать железо из воды магнитным фильтром? <https://ekomarket.ru/art022> (дата обращения 01.03.2023г)
3. Магнитные фильтры для смягчения воды – правда и вымысел <http://vesteon.ru/magnitnie-filtri-dlya-smyagcheniya-vody/> (дата обращения 10.03.2023г)
4. Груздев Е.Н., Стариков Е.Н. Водоподготовительная установка с применением мембранной технологии https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/026/45026188.pdf (Дата обращения 11.03.2023г)
5. Очистка воды с использованием обратного осмоса, электродиализа | Водный режим АЭС <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/vodnyy-rezhim-aes/Page-50.html> (Дата обращения 15.03.2023г)

References

1. Kak ochishchayut vodu AES <https://coralreef-aqua.ru/kak-ochishchayut-vodu-aes/> (Data obrashcheniya 01.03.2023g)
2. Ochistka vody magnitom <https://sistemyochistkivody.ru/magnitnaya-obrabotka-vodyi.html> (Data obrashcheniya 01.03.2023g) Mozhno li ubrat' zhelezo iz vody magnitnym fil'trom? <https://ekomarket.ru/art022> (Data obrashcheniya 01.03.2023g)
3. Magnitnye fil'try dlya smyagcheniya vody – pravda i vymysel <http://vesteon.ru/magnitnie-filtri-dlya-smyagcheniya-vody/> (Data obrashcheniya 10.03.2023g)
4. Gruzdev E.N., Starikov E.N. Vodopodgotovitel'naya ustanovka s primeneniem membrannoj tekhnologii https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/026/45026188.pdf (Data obrashcheniya 11.03.2023g)
5. Ochistka vody s ispol'zovaniem obratnogo osmosa, elektrodializa | Vodnyj rezhim AES <https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/vodnyy-rezhim-aes/Page-50.html> (Data obrashcheniya 15.03.2023g)

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 502.55

Анализ природоохранной деятельности филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская АЭС»

А.Р. Шарифулина¹, Е.В. Заблочкая²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹sharifulina01@mail.ru, ²evere82@mail.ru

Статья поступила 02.05.2023 г.; после доработки 03.05.2023 г.

Аннотация

В статье представлены результаты анализа деятельности в области охраны окружающей среды на территории филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская АЭС». Рассмотрены основные требования природоохранного законодательства Российской Федерации при эксплуатации атомных электростанций. Проанализирована деятельность в области обращения с отходами производства и потребления на Калининской АЭС. Исследованы воздухоохранные мероприятия и проведен анализ мероприятий по охране водных объектов реализованных на Калининской атомной электростанции.

Ключевые слова: деятельность в области охраны окружающей среды, атомная электростанция, отходы производства и потребления, воздухоохранные мероприятия, мероприятия по охране водных объектов.

Analysis of environmental protection activities of the Kalininskaya NPP branch of Concern Ros-Energoatom JSC

A.R. Sharifulina¹, E.V. Zablotskaya²Sevastopol state university, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia,
¹sharifulina01@mail.ru, ²evere82@mail.ru

Received 02.05.2023 y.; received in final form 03.05.2023 y.

Abstract

The article presents the results of the analysis of activities in the field of environmental protection in the territory of the branch of JSC Concern Rosenergoatom Kalininskaya NPP. The main requirements of the environmental legislation of the Russian Federation in the operation of nuclear power plants are considered. The activities in the field of waste management of production and consumption at the Kalinin NPP have been analyzed. Air protection measures were investigated and an analysis of measures for the protection of water bodies implemented at the Kalinin nuclear power plant was carried out.

Keywords: environmental protection activities, nuclear power plant, production and consumption waste, air protection measures, measures for the protection of water bodies.

Введение

За последние 25 лет доля выработки электроэнергии атомными электростанциями выросла с 11% до 18,5%.

Высокие показатели работы российских АЭС, ввод в эксплуатацию новых и продление

сроков действующих блоков атомной энергетики приводят к сокращению доли традиционной углеводородной составляющей энергосистемы России и, соответственно, предотвращают выброс в атмосферу значительного количества углекислого газа [1].

Природоохранная деятельность на АЭС связана с соблюдением требований экологической безопасности и обеспечивается за счет контроля за эффективностью газо- и водоочистных сооружений, соблюдения установленных нормативов выбросов в атмосферу, сбросов сточных вод в водные объекты, образования и размещения опасных отходов, повышения экологической культуры персонала и других организационно-технических мероприятий. Рациональное природопользование на АЭС достигается применением ресурсосберегающих технологий и снижением объемов потребления природных ресурсов [2].

Обеспечение экологической безопасности является безусловным приоритетом при осуществлении производственной деятельности в организациях Госкорпорации «Росатом». Применяемый в Госкорпорации «Росатом» системный подход к обеспечению экологической безопасности и охраны окружающей среды помог достичь высоких результатов и улучшить экологические показатели за несколько лет [1].

Постановка задачи

Целью данной работы являлся анализ деятельности в области охраны окружающей среды на территории филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская АЭС» в 2020 году.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

- рассмотреть основные требования природоохранного законодательства Российской Федерации при эксплуатации атомных электростанций;
- проанализировать деятельность в области обращения с отходами производства и потребления на Калининской АЭС в 2020 году;
- исследовать воздухоохранные мероприятия за 2020 год;
- провести анализ мероприятий по охране водных объектов реализованных на Калининской атомной электростанции.

Описание исследования

Деятельность Калининской атомной электростанции по охране атмосферного воздуха в 2020 году была направлена на соблюдение нормативов выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, контролю за соблюдением нормативов предельно допустимых выбросов.

Источники выбросов ЗВ Калининской АЭС располагаются на двух производственных площадках – основная площадка и полигон промышленных нерадиоактивных отходов. В процессе инвентаризации было выявлено 66 источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, из них 48 источников выброса организованные, 14 источников – неорганизованные и 4 источника выброса к которым не применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды [3].

Для контроля воздействия разработана и в полном объеме выполняется «Программа производственного экологического контроля». В программе помимо информации о сбросах в водные объекты и образовании отходов, содержатся сведения об инвентаризации выбросов и источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух. Производственный экологический контроль производится в пределах промышленной площадки, санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения Калининской АЭС, охватывает все факторы воздействия производственной деятельности АЭС на окружающую среду. Санитарно-защитная зона Калининской АЭС установлена распоряжением администрации Удомельского района радиусом в 1,2 км, отсчитываемым от геометрического центра вентиляционных труб энергоблоков №№ 1,2,3,4. Дополнительно в нее включена территория по сбросной канал на градирни. Зона наблюдения Калининской АЭС составляет окружность радиусом 11 км. Указанные зоны представлены на рисунках 1 и 2.

В 2020 году валовый объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников составил 12,227 т (разрешенный норматив валового выброса загрязняющих веществ в атмосферу составляет 373,613 т), в 2019 году выброс составил 13,542 т. Уменьшение массы выбросов загрязняющих веществ по сравнению с 2019 годом связано с заменой оборудования на котлах. Структура выбросов в атмосферу загрязняющих веществ приведена в таблице 1.

В 2020 году на Калининской атомной электростанции были реализованы следующие мероприятия по охране атмосферного воздуха:

1. Метеорологический мониторинг и мониторинг атмосферных процессов, влияющих на безопасность АЭС;
2. Выполнение работ по проведению комплекса наблюдений за микроклиматическими параметрами атмосферы в зоне

- | | |
|---|---|
| <p>наблюдения Калининской атомной станции;</p> <p>3. Выполнение работ по аэрологическому мониторингу района размещения КЛНАЭС;</p> <p>4. Выполнение работ по подготовке экспертно</p> | <p>аналитических заключений об опасных гидрометеорологических явлениях с расчетом гидрометеорологических показателей;</p> <p>5. Ремонт веттоборудования. Договор подряда на 2020-2025 гг.</p> |
|---|---|

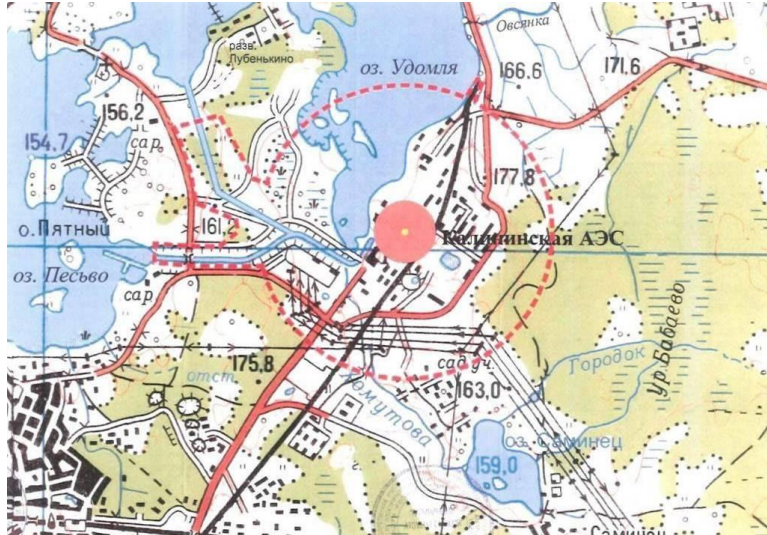


Рис. 1. Санитарно-защитная зона Калининской АЭС



Рис. 2. Схема постов радиационного контроля, санитарно-защитная зона и зона наблюдения Калининской АЭС

Таблица 1. Структура выбросов в атмосферу загрязняющих веществ в 2020 году

№		Наименование основных загрязняющих веществ	Класс опасности	ПДВ, т/год	Фактический выброс за 2020 год	
					т/год	% от нормы
1		Формальдегид	2	0,039	0,039	100
2		Диоксид серы	3	6,209	1,034	16,62
3		Оксиды азота (в пересчёте на NO ₂)	3	5,410	4,490	82,99
4		Оксид углерода	4	2,893	2,893	100
5		Метан	-	0,568	0,509	89,61
6		Прочие	-	358,494	3,262	0,9
		Всего	-	373,613	12,227	3,27

В настоящий момент в процессе производственной деятельности Калининской атомной станции возможно образование 107 видов отходов производства и потребления (нерадиоактивных). Следует отметить, что образование некоторых видов отходов происходит периодически, не ежегодно (например, при ремонте оборудования и коммуникаций, изменении технологических схем) [3]. Объем образования отходов в 2020 году увеличился. Это связано с большим объемом ремонтных и модернизационных работ на энергоблоке №1.

В 2020 году на Калининской атомной электростанции были реализованы следующие мероприятия по реализации отходов:

1. Реализация лома, содержащего драгметаллы;
2. Реализация отходов бумаги и картона с ППНО КЛНАЭС;
3. Реализация лома черных металлов;
4. Реализация свинца;
5. Обеспечение безаварийной эксплуатации полигона глубинного захоронения промстоков (ПГЗП) КЛН АЭС полигона глубин;
6. Выполнение работ по обезвреживанию остатков химикалий и термометров ртутных.

В ходе своей деятельности Калининская АЭС осуществляет производственный экологический контроль водных объектов. Для осуществления контроля сточных вод и наблюдения за водой водоемов, используемых КЛНАЭС в качестве охладителей технологического оборудования, лаборатория отдела охраны окружающей среды прошла процедуру аккредитации и имеет аттестат аккредитации [4].

Объектами производственного контроля являются озера Песью и Удомля, используемые в качестве водоемов-охладителей технологического оборудования КЛНАЭС и реки Съежа, Хомутовка, Овсянка, Тихомандрица, гидрологически связаны с ними (рис. 3). Произ-

водственный экологический контроль осуществляется до и после 6 выпусков нормативно-очищенных стоков вод в оз. Удомля, р. Хомутовка и р. Волчина [5].

Объектами производственного экологического контроля, выполняемого аккредитованными лабораториями ООС Калининской АЭС, ФГУЗ ЦГиЭ-141 ФМБА России, ФГБУ «ЦЛАТИ по ЦФО», являются также:

- циркуляционные воды от охлаждения турбинного оборудования в отводящих каналах;
- природные воды в озерах Песью, Удомля, р. Съежа и устьях впадающих водотоков.

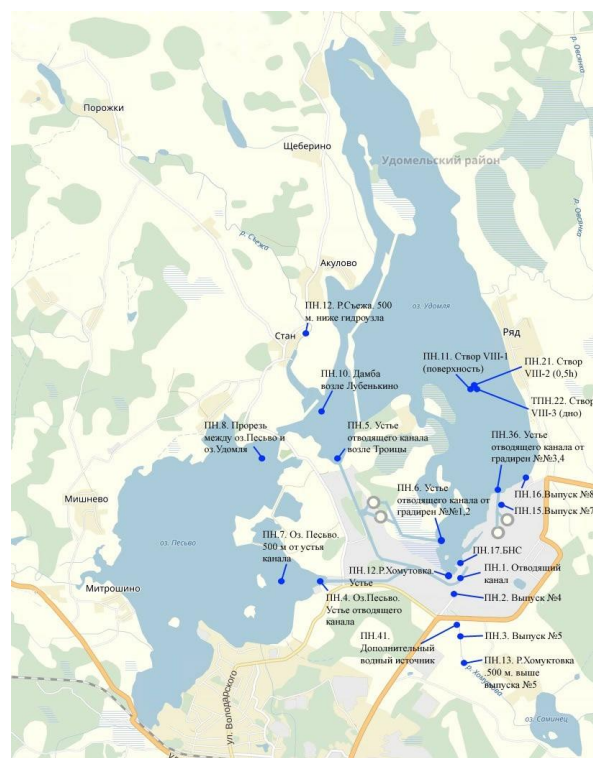


Рис. 3. Схема контроля гидрохимических показателей на водоеме-охладителе (водохранилище Калининской АЭС) в зоне наблюдения АЭС

Все сточные воды, сбрасываемые Калининской АЭС в водные объекты, подвергаются очистке на очистных сооружениях. Работы по контролю качества природных, нормативно-очистных, сточных вод, испытывающих влияние КалнАЭС, выполняются в соответствии с программами производственного экологического контроля для объектов НВОС разных категорий в соответствии с установленным регламентом.

В 2020 году на Калининской атомной электростанции были реализованы следующие мероприятия по охране водных объектов:

1. Выполнение регламента производственного экологического контроля озер-охладителей. В соответствии с «Программой производственного экологического контроля для объекта НВОС II категории «Промышленная площадка Калининской АЭС» Филиала АО «Концерн Росэнергоатом «Калининской атомная станция»;
2. Обеспечение соблюдения нормативов допустимых сбросов загрязняющих веществ в выпуск. В соответствии с «Программой производственного экологического контроля для объекта НВОС II категории «Промышленная площадка Калининской АЭС» Филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининской АЭС»;
3. Оказание услуг по зарыблению озер-охладителей Песьво и Удомля. По договору с ООО «НЦ Селекцентр» Произведено зарыбление озёр-охладителей Песьво и Удомля сеголетками чёрного амура общим весом 1038 кг, средней навеской 12,5 г.

Ежегодно КалнАЭС выполняет биомелиорацию – искусственное вселение в водохранилище ценных видов рыб. В 2019 и 2020 гг зарыбление озер производилось черным амуром. В 2020 году произведено зарыбление сеголетком черного амура средней навеской 0,02 кг общим весом 1082,0 кг. Благодаря такой ежегодной биологической мелиорации биологическое разнообразие видов рыб в озерах Песьво и Удомля выше, чем в других водоемах Удомельского района.

В последние годы на озерах-охладителях Калининской АЭС интенсивно развивается товарное выращивание теплолюбивых видов рыбы. В Удомле работают пять рыбоводческих хозяйств, которые располагаются на берегу озера Песьво. Они специализируются на выращивании рыбы осетровых пород и форели, а также икры и мальков различных пород рыб:

- ООО "Аквакультура";
- ИП Крестьянско-фермерское хозяйства Давыдова М.И.;

- СПК "Калининский рыбхоз";
- ООО "Нептун";
- Рыболовно-туристическая база «Щеберено» (ведется строительство).

Разведение и выращивание рыб в озерах-охладителях электростанций широко практикуется. Рыбхозы-хозяйственное использование теплых вод существенно повышает эффективность традиционных форм рыбоводства – вегетационный период у рыбы продолжается круглый год и не зависит от природно-климатических условий. Выращиваемая товарная рыбная продукция рыбхозов полностью соответствует санитарным требованиям, предъявляемым к рыбной продукции, и поставляется в розничную торговую сеть и предприятия общественного питания городов Удомля, Вышний Волочек, Тверь, Москва, Санкт-Петербург.

Озера-охладители Калининской АЭС Песьво и Удомля имеют статус водоемов высшей рыбохозяйственной категории. Это обстоятельство налагает на атомное предприятие чрезвычайно жесткие требования по сохранению экологически благополучного состояния этих объектов. Именно для поддержания природного баланса водных экосистем и ихтиофауны озер-охладителей на гидротехнических сооружениях Калининской АЭС действуют рыбозащитные сооружения. «Пескарик» – рыбозащитное устройство гидроакустического принципа действия. На текущий момент это одна из самых новых технологий. Генерируя звук определенной частоты, эта система отпугивает обитателей водоема от потенциально опасного для них участка, то есть рыба уходит из локальной зоны забора воды на расстояние около 10–20 метров. С точки зрения экологов, это абсолютно безопасная разработка, не наносящая вреда физиологии рыб.

Заключение

1. В ходе работы были рассмотрены основные нормативные правовые акты, регламентирующие природоохранную деятельность на атомных электростанциях Российской Федерации.

2. В 2020 году установленные для Калининской АЭС нормативы (ПДВ) загрязняющих веществ в атмосферный воздух не были превышены ни по одному из нормируемых показателей. Валовый объем выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от стационарных источников составил 12,227 т (разрешенный норматив валового выброса загрязняющих веществ в атмосферу составляет 373,613 т), в 2019 году выброс составил 13,542 т. Уменьшение массы выбросов

загрязняющих веществ по сравнению с 2019 годом связано с заменой оборудования на котлах.

3. В процессе производственной деятельности Калининской атомной станции возможно образование 107 видов отходов производства и потребления. Образование некоторых видов отходов происходит периодически, не ежегодно (например, при ремонте оборудования и коммуникаций, изменении технологических схем). На все виды отходов КЛНАЭС (за исключением отходов V класса опасности для окружающей среды) оформлены паспорта опасных отходов. Лимиты размещения отходов производства и потребления в 2020 году не были превышены ни по одному отходу, входящему в перечень отходов, образующихся на КЛНАЭС. Годовой объем отходов, образовавшихся на КЛНАЭС в 2020 году, по сравнению с 2019 годом увеличился, что связано с ремонтными работами по ПСЭ. Параметры окружающей среды на объектах размещения отходов КЛНАЭС соответствуют природоохранным и санитарно-гигиеническим требованиям.

4. В 2020 году случаев превышения НДС ЗВ в выпусках сточных вод Калининской АЭС зафиксировано не было. Санитарно-гигиеническое состояние воды в водоемах-охладителях КЛНАЭС соответствует нормативным критериям. Планы мероприятий КЛНАЭС по соблюдению нормативов допустимых сбросов реализуются в полном объеме. Ежегодные планы мероприятий КЛНАЭС, направленные на защиту водных биологических водных ресурсов озер Песьво и Удомля, а также среды их обитания реализуются в полном объеме. Очистные сооружения на выпусках сточных вод КЛНАЭС в 2020 году работали в штатном безаварийном режиме, обеспечив нормативное качество сбрасываемых сточных вод КЛНАЭС. Безаварийная эксплуатация ПГЗ позволила поддерживать валовые сбросы ЗВ в озера-охладители КЛНАЭС на минимальном уровне.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2017 году». М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2018. 888 с.
2. Основные правила обеспечения охраны окружающей среды на атомных станциях: утв. генеральным директором АО «Концерн Росэнергоатом» А.Ю. Петров от 01.04.2019 // Стандарт организации СТО 1.1.1.01.99.0466-2018. Москва. 2018. 69 с.
3. Годовой отчет о природоохранной деятельности

филиала АО «Концерн Росэнергоатом» «Калининская атомная станция» за 2020 год / А.Ю. Данилкин [и др.] // 2021. 125 с.

4. Об охране окружающей среды: Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ // "Российская газета" от 12 января 2002 г. N 6.
5. Руководство по организации контроля состояния природной среды в районе расположения АЭС // под ред. К.П. Махонько [и др.]. Гидрометеиздат. 1990. С. 16-22.

References

1. State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2017". Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; NPP "Cadastre", 2018. 888 p.
2. Basic rules for ensuring environmental protection at nuclear power plants: approved by the General Director of JSC "Concert Rosenergoatom" A.Yu. Petrov dated 01.04.2019 // STO Organization Standard 1.1.1.01.99.0466-2018. Moscow. 2018. 69 p.
3. Annual report on the nature conservation activities of the branch of JSC Concern Rosenergoatom "Kalininskaya Nuclear Power Plant" for 2020 / A.Y. Danilkin [et al.] // 2021. 125 p.
4. On Environmental protection: Federal Law No. 7-FZ of 10.01.2002 // Rossiyskaya Gazeta of January 12, 2002 № 6.
5. Guidelines for the organization of control of the state of the natural environment in the area of the NPP location // edited by K.P. Makhonko [et al.]. Hydrometeorological data. 1990. pp. 16-22.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 004.421.5

Технологии использования псевдослучайных последовательностейА.О. Егорова¹, А.В. Сагалаев¹, Р.А. Филатов¹¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, aokalita@sevsu.ru

Статья поступила 15.05.2023 г.; после доработки 16.05.2023 г.

Аннотация

В данной статье рассмотрены псевдослучайные последовательности и технологии их использования. Исследованы отличительные особенности псевдослучайной последовательности от случайной. Рассмотрены генераторы псевдослучайной последовательности и критерии их криптостойкости. Также изучен аспект правового регулирования применения генераторов псевдослучайной последовательности с целью обеспечения информационной безопасности.

Ключевые слова: информационная безопасность, псевдослучайная последовательность, криптографическая стойкость, генератор псевдослучайной последовательности.

Technologies of use pseudo-random sequencesA.O. Egorova¹, A.V. Sagalaev¹, R.A. Filatov¹¹Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
aokalita@sevsu.ru

Received 15.05.2023 y.; received in final form 16.05.2023 y.

Abstract

This article discusses pseudo-random sequences and technologies for their use. The distinctive features of a pseudo-random sequence from a random one are investigated. Pseudo-random sequence generators and criteria for their cryptographic strength are considered. The aspect of legal regulation of the use of pseudo-random sequence generators in order to ensure information security has also been studied.

Keywords: information security, pseudorandom sequence, cryptographic strength, pseudorandom sequence generator.

Введение

Использование псевдослучайных последовательностей распространено в криптографии (используется сгенерированная двоичная псевдослучайная последовательность), при шифровании, при обеспечении обмена данными между устройствами [1], при обеспечении работы методов аутентификации, вычисления цифровой подписи, а также при решении определенных задач в различных науках, например, физика, экономика, математика, химия, теория управления и

оптимизации.

Псевдослучайную последовательность также используют для оценки мер сходства, к примеру, при анализе различия между исходным сигналом и сигналом, полученным в результате стенографического кодирования [2].

Псевдослучайная последовательность никогда не будет являться абсолютно случайной, так как псевдослучайная последовательность – это детерминированная периодическая последовательность чисел, но при этом она обладает всеми

свойствами случайного сигнала, данное утверждение было доказано по принципу Дирихле. Чтобы определить, что сгенерированная последовательность псевдослучайна, необходимо проводить оценку случайности.

Псевдослучайные последовательности

В работе рассматривается тема псевдослучайных последовательностей и их генерации. Псевдослучайные последовательности используются в различных сферах, например, для генерации ключей шифрования, вычисления цифровой подписи и произведения работы алгоритмов аутентификации [3].

Далее будут приведены основные теоретические понятия для псевдослучайных последовательностей и их генераторов. Псевдослучайная последовательность (ПСП) — числовая последовательность, вычисленная или сгенерированная по какому-либо арифметическому правилу или методу, но при этом обладает всеми свойствами случайной последовательности [4]. Случайное число — число, являющееся реализацией случайной величины [5].

Так как ПСП — число, полученное в результате работы детерминированного алгоритма, следовательно, оно повторится после определенного периода [4, 6]. Данное свойство было доказано с помощью принципа Дирихле [4]. Принцип Дирихле — метод доказательства утверждений о конечном множестве, сформулированный немецким математиком Дирихле [7].

Для генерации ПСП используется детерминированный алгоритм. Детерминированный алгоритм — алгоритм, способный возвращать такие же выходные значения, при тех же входных значениях [8]. Аналогично, как и для обычных чисел, ПСП имеют двоичную форму представления.

Псевдослучайная двоичная последовательность — частный случай псевдослучайной последовательности, элементы которой имеют двоичную кодировку (элементы принимают значения 0 и 1).

Для указанного выше вида псевдослучайной последовательности существуют постулаты Голомба [8]. Постулаты Голомба — основные правила для статистических свойств периодических ПСП, представленная Соломоном Голомбом [9].

Существует всего 3 постулата:

- 1) количество единиц в каждом периоде обязано отличаться от количества нулей не

больше, чем на 1;

- 2) в каждом периоде половина серий (серия — одинаковые символы) должна иметь длину 1, четверть серии должна быть длиной 2, 8-ая часть с длиной 3, и т.д.;
- 3) информация некоторого предыдущего значения не помогает предположить о текущем значении.

Последовательности, удовлетворяющие всем 3 постулатам, называются псевдо-шумовыми последовательностями или ПШ-последовательностями [9].

Генераторы псевдослучайных последовательностей чисел

Рассмотрим теоретические основы генераторов псевдослучайных чисел. Генератор псевдослучайных чисел (ГПСЧ) — алгоритм, генерирующий последовательность чисел, каждый элемент которой, не зависит от другого элемента последовательности и обычно подчиняется заданному распределению. Качество любой сгенерированной псевдослучайной последовательности, зависит от качества ГПСЧ [10].

Генератор псевдослучайных бит (ГПСБ) — детерминированный алгоритм, получающий на вход определенную бинарную последовательность, дающую на выходе псевдослучайную последовательность бит [5].

Существует три основных требования, предъявляемые к криптографически стойким ГПСЧ [11]:

- 1) период ПСП должен быть достаточно большим, чтобы была возможность шифровать любые сообщения различной длины;
- 2) ПСП должна быть труднопредсказуемой величиной;
- 3) генерация ПСП не должна приносить организационные или технические проблемы.

Примеры ГПСЧ [11]:

- 1) генератор на основе метода ANSI X9.17 [11];
- 2) циклическое шифрование [10];
- 3) алгоритм Блум-Блум-Шуба [13].

Правовое поле применения псевдослучайных последовательностей

Использование псевдослучайных последовательностей и их генераторов ограничивается законом, ниже будут указаны разрешения и запреты для использования ПСП и ГПСЧ.

1. Использование ПСП указывается в приказе

МИНСВЯЗИ РФ от 10.08.96 № 92 об утверждении норм на электрические параметры основных цифровых каналов и трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей ВСС России, а именно в пункте 6.4.3.1 [14].

2. Так как ПСП используются в криптографии, например, для создания ключей шифрования, то алгоритмы ГПСЧ и ГПСБ входят в состав приложения приказа ФСБ РФ от 9 февраля 2005 г. № 66, а именно положение о разработке, производстве, реализации и эксплуатации шифровальных (криптографических) средств защиты информации (Положение ПКЗ-2005) [15].
3. Постановление Правительства РФ от 16.04.2012 №313 город Москва, который утверждает положения о лицензировании любой деятельности, связанной с разработкой, производством и распространением любых шифровальных (криптографических средств) [16].
4. ПСП используется в вычислении цифровой подписи, следовательно, в правовое поле вступает Федеральный закон № 63 от 06.04.2011 (редактирован от 30.12.2015) об электронной подписи [17].
5. Метод. рекомендации МИНКОМСВЯЗИ по составу сертификата ключа для проверки электронной цифровой подписи [18].
6. Приказ ФАПСИ от 13.06.2001 №152 [19].
7. Приказ ФСБ РФ от 27.12.2011 №796 г. Москва, который утверждает требования к средствам электронной подписи и средствам удостоверяющего центра [20].

Заключение

Таким образом, были описаны основные понятия для псевдослучайных последовательностей, а также изучены технологии, использующие данный вид последовательностей чисел, которые понадобятся в описании принципа работы исследуемого проекта.

Список литературы

1. Начаров, Д. В. Исследование генераторов псевдослучайных последовательностей на основе регистра сдвига с линейной обратной связью / Д. В. Начаров, Е. С. Серяк, Ю. П. Михайлюк // Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций. – 2021. – № 4. – С. 170.
2. Lykholob P.G. Medvedeva A. A., Likhogodina E. C., Mishina O. O. Research of sensitivity of some measures of quality assessment of hidden information in the audio content. С. 201.
3. Псевдослучайная последовательность // Академик URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/313834> (дата обращения: 27.11.2022).
4. Blum-Blum-Shub generator и его применение // Хабр URL: <https://habr.com/ru/post/534698/> (дата обращения: 27.11.2022).
5. Псевдослучайные последовательности // Оз-lib URL: https://ozlib.com/1017866/tehnika/psevdosluchaynye_posledovatelnosti (дата обращения: 27.11.2022).
6. Принцип Дирихле (комбинаторика) // Википедия URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Принцип_Дирихле_\(комбинаторика\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Принцип_Дирихле_(комбинаторика)) (дата обращения: 27.11.2022).
7. Детерминированный алгоритм // Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Детерминированный_алгоритм (дата обращения: 27.11.2022).
8. Псевдослучайная двоичная последовательность // Академик URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/313837> (дата обращения: 27.11.2022).
9. Генератор псевдослучайных чисел // Академик URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/6425> (дата обращения: 27.11.2022).
10. Псевдослучайные последовательности и методы их генерации // Справочник от автор 24 URL: https://spravochnik.ru/informatika/psevdosluchaynye_posledovatelnosti_i_metody_ih_generacii/ (дата обращения: 27.11.2022).
11. Генератор псевдослучайных чисел // Википедия URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Генератор_псевдослучайных_чисел (дата обращения: 27.11.2022).
12. Генератор псевдослучайных чисел // Академик URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/6425> (дата обращения: 27.11.2022).
13. Алгоритм Блума — Блума — Шуба // Академик URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/614129> (дата обращения: 27.11.2022).
14. ПРИКАЗ МИНСВЯЗИ РФ ОТ 10.08.96 N 92 ОБ УТВЕРЖДЕНИИ НОРМ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ОСНОВНЫХ ЦИФРОВЫХ КАНАЛОВ И ТРАКТОВ МАГИСТРАЛЬНОЙ И ВНУТРИЗОНОВЫХ ПЕРВИЧНЫХ СЕТЕЙ ВСС РОССИИ // Законы России URL: https://lawrussia.ru/bigtexts/law_2718/index.html (дата обращения: 28.11.2022).
15. Приказ ФСБ РФ от 9 февраля 2005 г. // Криптоком URL: <https://www.cryptocom.ru/law/pkz2005.html> (дата обращения: 28.11.2022).
16. Постановление Правительства Российской Федерации от 16 апреля 2012 г. N 313 г. Москва // Криптоком URL:

- <https://www.cryptocom.ru/law/313.html> (дата обращения: 28.11.2022).
17. ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН N 63-ФЗ от 06.04.2011 (ред. от 30.12.2015) ОБ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСИ // Криптоком URL: <https://www.cryptocom.ru/law/digitalsign.html> (дата обращения: 28.11.2022).
 18. Методические рекомендации по составу квалифицированного сертификата ключа проверки электронной подписи Версия 1.9 // Криптоком URL: https://www.cryptocom.ru/law/Metodicheskie_rekomendatsii_po_sostavu_kvalifitsirovannogo_serifikata_klyucha_proverki_elektronnoj_.pdf (дата обращения: 28.11.2022).
 19. Приказ ФАПСИ от 13 июня 2001 г. N 152 "Об утверждении Инструкции об организации и обеспечении безопасности хранения, обработки и передачи по каналам связи с использованием средств криптографической защиты информации с ограниченным доступом, не содержащей сведений, составляющих государственную тайну" // Криптоком URL: <https://www.cryptocom.ru/law/order152.html> (дата обращения: 28.11.2022).
 20. Приказ Федеральной службы безопасности Российской Федерации от 27 декабря 2011 г. N 796 г. Москва "Об утверждении Требований к средствам электронной подписи и Требованиям к средствам удостоверяющего центра" // Криптоком URL: <https://www.cryptocom.ru/law/796.html> (дата обращения: 28.11.2022).
- ## References
1. Nacharov, D. V. Investigation of pseudorandom sequence generators based on a shift register with linear feedback / D. V. Nacharov, E. S. Seryak, Yu. P. Mikhailyuk // Modern problems of radio electronics and telecommunications. – 2021. – No. 4. – p. 170.
 2. Lykholob P.G. Medvedeva A. A., Likhogodina E. C., Mishina O. O. Research of sensitivity of some measures of quality assessment of hidden information in the audio content. C. 201.
 3. Pseudo-random sequence // Academician URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/313834> (Accessed 11/27/2022).
 4. Blum-Blum-Shub generator and its application // Habr URL: <https://habr.com/en/post/534698/> (Accessed: 11/27/2022).
 5. Pseudo-random sequences // Ozlib URL: https://ozlib.com/1017866/tehnika/psevdoslu-chaynye_posledovatelnosti (accessed 11/27/2022).
 6. Dirichlet's principle (combinatorics) // Wikipedia URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Dirichlet's_principle_\(combinatorics\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Dirichlet's_principle_(combinatorics)) (Accessed: 11/27/2022).
 7. Deterministic algorithm // Wikipedia URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Deterministic_algorithm#:~:text=Deterministic%20algorithm%20—%20algorithmic%20process%2C%20which,result%20for%20given%20input%20data . (date of access: 11/27/2022).
 8. Pseudo-random binary sequence // Academician URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/313837> (accessed 11/27/2022).
 9. Pseudo-random number generator // Academician URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/6425> (Accessed 27.11.2022).
 10. Pseudo-random sequences and methods for their generation // Handbook from the author 24 URL: https://spravochnik.ru/informatika/psevdoslu-chaynye_posledovatelnosti_i_metody_ih_generacii/ (date of access: 11/27/2022).
 11. Pseudo-random number generator // Wikipedia URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Pseudo-random_number_generator (Accessed: 11/27/2022).
 12. Pseudo-random number generator // Academician URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/6425> (Accessed 27.11.2022).
 13. Blum-Blum-Shuba algorithm // Akademik URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/614129> (accessed 27.11.2022).
 14. ORDER OF THE MINISTRY OF COMMUNICATIONS OF THE RUSSIAN FEDERATION OF 10.08.96 N 92 ON THE APPROVAL OF REGULATIONS FOR THE ELECTRICAL PARAMETERS OF THE MAIN DIGITAL CHANNELS AND TRACKS OF THE BACK AND INTRA-ZONE PRIMARY NETWORKS OF THE VSS OF RUSSIA // Laws of Russia URL: https://lawrus-sia.ru/bigtexts/law_2718/index.html (date accessed: 11/28/2022).
 15. Order of the Federal Security Service of the Russian Federation of February 9, 2005 // Cryptocom URL: <https://www.cryptocom.ru/law/pkz2005.html> (date of access: 11/28/2022).
 16. Decree of the Government of the Russian Federation of April 16, 2012 N 313 Moscow // Cryptocom URL: <https://www.cryptocom.ru/law/313.html> (date of access: 11/28/2022).
 17. FEDERAL LAW N 63-FZ of April 6, 2011 (as amended on December 30, 2015) ON ELECTRONIC SIGNATURE // Cryptocom URL: <https://www.cryptocom.ru/law/digitalsign.html> (date of access: 11/28/2022).
 18. Guidelines for the composition of a qualified certificate of the electronic signature verification key Version 1.9 // Cryptocom URL: https://www.cryptocom.ru/law/Metodicheskie_rekomendatsii_po_sostavu_kvalifitsirovannogo_serifikata_klyucha_proverki_elektronnoj_.pdf (date of access: 11/28/2022).
 19. FAPSI order of June 13, 2001 N 152 "On approval of the Instruction on the organization and security of storage, processing and transmission through communication channels using cryptographic protection of information with limited access that does not contain information constituting a state secret" // Cryptocom URL: <https://www.cryptocom.ru/law/152.html> (date of access: 11/28/2022).

to.com URL: <https://www.cryptocom.ru/law/order152.html> (date of access: 11/28/2022).

20. Order of the Federal Security Service of the Russian Federation of December 27, 2011 N 796 Moscow "On Approval of the Requirements for Electronic Signature Tools and Requirements for Certification Center Tools" // Cryptocom URL: [https://www.cryptocom.ru /law/796.html](https://www.cryptocom.ru/law/796.html) (date of access: 11/28/2022).

УДК 629.125

Надводный беспилотный аппарат для противодействия морским пиратам

И.И. Свириденко, Д.И. Свириденко

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, i.sviridenko@mail.ru

Статья поступила 28.05.2023 г.; после доработки 29.05.2023 г.

Аннотация

С целью противодействия нападению морских пиратов на гражданские суда предлагается использование дистанционно управляемого надводного беспилотного аппарата (НБА), снабженного сеткомётами. При угрозе нападения морских пиратов, атакующих судно на моторных лодках, с судна сбрасывается НБА и наводится на курс пиратской лодки перед ней. С помощью сеткомётов НБА выбрасывает полипропиленовые сетки в сторону движущейся следом пиратской лодки. Наматывая сетку на свой винт, пиратская лодка остановится, что даст экипажу судна несколько часов, чтобы уйти из района нападения.

Ключевые слова: безопасность морских перевозок, морское пиратство, надводный беспилотный аппарат, сеткомёт, 3D модель.

Surface unmanned vehicle to counter sea pirates

I.I. Sviridenko, D.I. Sviridenko

¹Sevastopol State University, 33, Universitetskaja st., Sevastopol, 299053, Russia, i.sviridenko@mail.ru

Received 28.05.2023 y.; received in final form 29.05.2023 y.

Abstract

In order to counter the attack of sea pirates on civilian ships, it is proposed to use a remotely controlled surface unmanned vehicle (SUV) equipped with Net Guns. When there is a threat of an attack by sea pirates attacking a ship in motor boats, an SUV is launched from the ship and is guided to the course of the pirate boat in front of it. With the help of Net Guns, the SUV throws polypropylene nets towards the pirate boat moving behind. By winding the mesh around its propeller, the pirate boat will stop, which will give the ship's crew a few hours to leave the attack area.

Keywords: shipping security, maritime piracy, surface unmanned aerial vehicle, Net Gun, 3D modeling.

Введение

Обеспечение безопасности морских перевозок является сегодня актуальной задачей. Проблема морского пиратства в настоящее время стала настолько серьезной, что многие государства, доставляющие грузы морем, вынуждены поддерживать присутствие своих военно-морских сил в районах активных действий пиратов. Но и эти меры не обеспечивают безопасность морских перевозок, так как количество военно-

морских сил и средств, задействованных в решении рассматриваемой проблемы, а также радиус их оперативной досягаемости ограничены. А география современного морского пиратства весьма обширна (рисунок 1).

Поэтому задача защиты гражданского судна от нападения пиратов, как правило, решается экипажем самого судна.

Наиболее эффективным методом защиты гражданских судов от нападения пиратов является использование против них летального оружия подразделениями военно-морских сил или

частными военными компаниями, имеющими специальные лицензии (рисунок 2). Но это – очень дорогой метод и далеко не каждый судовладелец может себе его позволить.



Рис. 1. География современного морского пиратства [1]

Экипажам судов для своей защиты разрешено использовать только нелетальные технические средства. К ним относятся пожарные шланги и водяные пушки (рисунок 3, а), а также заграждения из колючей проволоки (рисунок 3, б).



Рис. 2. Вооруженная охрана на борту судна

Известно также об успешном применении стеклянных бутылок с бензином (коктейлем Молотова) китайскими моряками против пиратов в Аденском заливе [2].

Другим эффективным методом защиты может стать применение беспилотных летательных аппаратов, позволяющих их обнаружить еще на достаточном удалении пиратов от судна (рисунок 3, а) и даже их атаковать (рисунок 4, б, в) [3].

Стоимость таких беспилотников сравнительно высока и управление ими требует использования специальных управляющих комплексов и серьезных навыков оператора, особенно, если планируется применять ударные беспилотные

аппараты.

а)



б)



Рис. 3. Использование водяной противопожарной системы (а); колючее ограждение борта (б)

Для оказания эффективного противодействия морским пиратам, атакующим гражданское судно, предлагается использование нелетального оружия, представляющего собой надводный беспилотный аппарат (НБА), управляемый по радио с этого судна.

НБА оборудуется сеткометом, выстреливающим в сторону идущей следом пиратской лодки полипропиленовую сетку для блокирования ее гребного винта.

Целью статьи является анализ возможности использования такого беспилотника, особенностей его конструкции и возможного применения,

а также представление 3D модели корпуса НБА.

а)



б)



в)



Рис. 4. Беспилотные летательные аппараты: наблюдения (а), ударные (б), (в)

Особенности конструкции и применения надводного беспилотного аппарата

Основными требованиями, предъявляемыми к разрабатываемому беспилотнику являются минимальные габариты, возможность двигаться с достаточно высокой скоростью при определенном волнении, а также иметь соответствующую остойчивость, устойчивость на курсе,

управляемость и способность к восстановлению нормального положения корпуса после опрокидывания. Последнее требование является обязательным, так как аппарат должен надежно функционировать в открытом море при соответствующем волнении и ветре.

На рисунке 5 представлен внешний вид 3D модели предлагаемого НБА. Основными особенностями его корпуса являются умеренно килевое днище с килеватостью на транце 15 градусов, с «веерным» увеличением килеватости к носу, с плоской центральной лыжей в корме в районе расположения водозаборника водомета и малокилевой (до 5 градусов) лыжей в центральной части корпуса, ограниченной по ширине парой продольных внешних реданов. В килевой части корпуса расположены по два продольных внутренних редана по каждому борту.

Предлагаемые обводы корпуса позволяют беспилотнику надежно и эффективно выполнять поставленную задачу на большой скорости в условиях высокой волны.

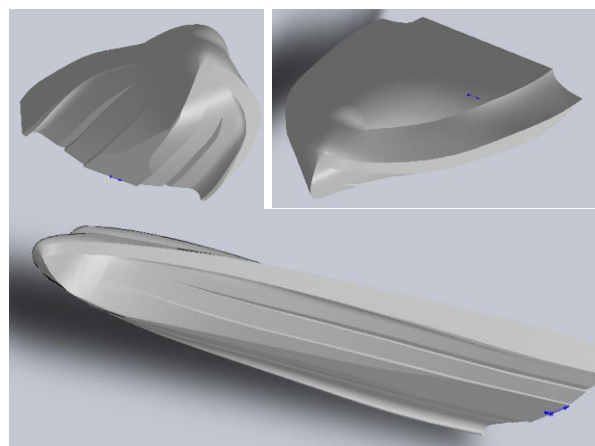


Рис. 5. Внешний вид 3D модели НБА

В кормовой части НБА размещается специальное устройство – сеткомёт для выброса полипропиленовой сетки в сторону своего кильватерного следа. Сеткомёт выполняет функцию нелетального оружия, которое обеспечит противодействие морским пиратам.

При угрозе нападения морских пиратов, атакующих гражданское судно на моторных лодках с подвесными двигателями, с судна сбрасывается НБА и наводится на курс пиратской лодки перед ней таким образом, чтобы пиратская лодка оказалась в кильватерном следе НБА (рисунок 6).

НБА выбрасывает в сторону движущейся следом пиратской лодки полипропиленовые

сетки. Распрямляясь в полете и опускаясь на поверхность воды, сетки образуют своеобразный «барьер» перед движущейся с большой скоростью лодкой. Увернуться и избежать наезда на плавающие сетки пиратской лодке будет очень сложно, практически невозможно. При наезде лодки на сетку, последняя наматывается на ее винт. При этом на винте образуется «ком» из сплавленного полипропилена, который блокирует работу подвесного двигателя. В результате пиратская лодка остановится.

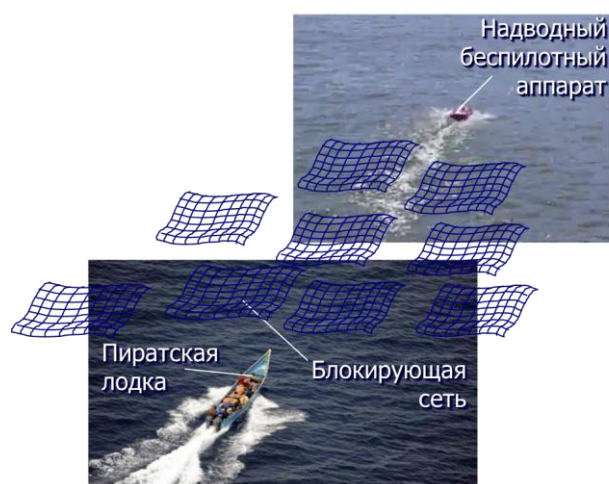


Рис. 6. Выброс блокирующих сеток перед пиратской лодкой

Чтобы освободить винт от образовавшегося «кома» пиратам потребуется несколько часов. Причем для освобождения винта от сплавленного полипропилена необходимо будет использовать ручной режущий инструмент, например, ножовки и подводное снаряжение. Да и качка в открытом море небольшой лодки не будет способствовать быстрому выполнению такой операции.

Пока пираты будут «освобождать» движитель своей лодки, экипаж судна получит запас времени в несколько часов, чтобы уйти из района нападения на достаточно безопасное расстояние или дожидаться помощи от военно-морских сил.

Особенности применения сеткометов

Существует целый ряд сеткометов, основными из которых являются устройства для отлова животных, полицейские и сеткометы для защиты от нападающих (рисунок 7). Принцип их использования практически одинаков: сеть выстреливается в направлении объекта поражения сверху, вдогон или на встречу нападающему.

Объект поражения запутывается в сетке, теряя возможность передвигаться (рисунок 8, а, б). Свою эффективность показало применение сеткометов для блокирования малых летающих беспилотников.

При использовании сетки для создания эффективной преграды движущейся моторной лодке с подвесным двигателем, её необходимо выстреливать в направлении своей кильватерной струи в сторону носа пиратской лодки. После выстрела сеть еще в полете разворачивается на всю свою ширину (рисунок 8, в) и, опустившись на поверхность воды, создаст максимальную по фронту полосу – преграду. Требуемое развернутое положение сетки на поверхности воды обеспечивается использованием специальной системы грузов.



Рис. 7. Сеткометы: для отлова животных (а), полицейский (б), для защиты от нападающего (в)

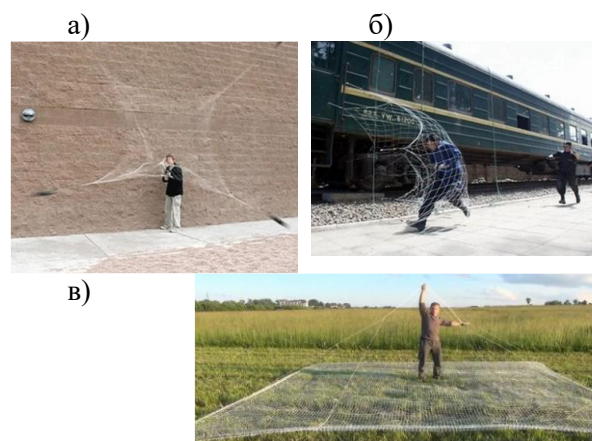


Рис. 8. Варианты наброса сетки: полицейские сеткометы (а), (б), требуемое положение сетки на горизонтальной поверхности (в)

На НБА планируется размещать несколько сеткометов. Для выстрела сетки следует использовать

зовать пневмоустройства (рисунок 9), надежность которых по сравнению с холостыми огнестрельными патронами не будет зависеть от возможного намокания. Кроме того, для повышения эффективности необходимо использовать специальные приспособления, например реактивные ускорители, исключаяющие отдачу при выбросе сетки из тубуса сеткомета [4].

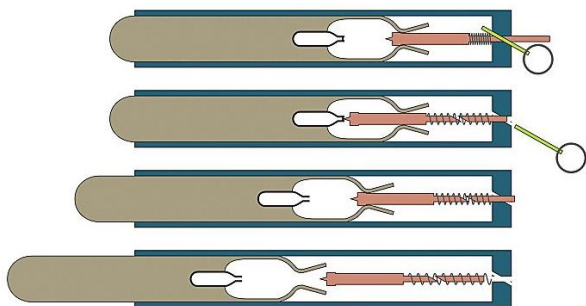


Рис. 9. Пневмовыброс сетки с реактивным ускорителем (вариант) [4]

Заключение

Применение НБА, оборудованных сеткомётами, может стать эффективным средством противодействия морским пиратам, пытающимся захватить гражданское судно. Для создания таких НБА следует использовать отработанные судномодельные технологии изготовления скоростных радиоуправляемых моделей.

Основные особенности этих беспилотников: высокая скорость, мореходность, маневренность, управляемость, способность восстанавливать свое нормальное положение после опрокидывания, обеспечат эффективность применения НБА против пиратов.

На каждом судне, пересекающем потенциально опасный район с угрозой пиратского нападения, рекомендуется иметь несколько НБА с сеткомётами.

С учетом того, что сегодня количество грузовых судов среднего и большого водоизмещения исчисляется тысячами и вероятность их нахождения в этих районах достаточно велика, объем возможного производства НБА может оцениваться в десятки тысяч беспилотников. Кроме того, следует обеспечить специальную подготовку членов экипажей судов в морских тренажерных центрах, осуществляющих подготовку и переподготовку плавсостава, с целью обучения членов экипажей навыкам управления беспилотниками, их технического и ремонтного обслуживания.

При выполнении перечисленных условий

предложенный метод позволит существенно снизить уязвимость гражданского судна от нападения морских пиратов.

Список литературы

1. Современные морские пираты [Электронный ресурс]. URL: <https://doseng.org/interesnoe/98414-sovremennye-morskie-piraty.html> (дата доступа: 17.10.2021).
2. Защита судна от пиратов: как предотвратить атаку [Электронный ресурс]. URL: <https://maritime-zone.com/news/view/zashhita-sudna-ot-piratov-kak-predotvratit-ataku> (дата доступа: 15.10.2021).
3. 1001 способ применения дронов в морской индустрии. Электронный ресурс]. URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/maritime-drones-deployment/7588/> (дата доступа: 11.10.2021).
4. Нелетальное оружие – сетемёт [электронный ресурс]. URL: https://forum.guns.ru/forum_light_message/117/462938.html (дата доступа: 15.10.2021).

References

1. Modern sea pirates [electronic resource]. URL: <https://doseng.org/interesnoe/98414-sovremennye-morskie-piraty.html> (accessed: 17.10.2021).
2. Protecting a ship from pirates: how to prevent an attack [electronic resource]. URL: <https://maritime-zone.com/news/view/zashhita-sudna-ot-piratov-kak-predotvratit-ataku> (accessed: 15.10.2021).
3. 1001 applications of drones in the maritime industry. [electronic resource]. URL: <https://www.kaspersky.ru/blog/maritime-drones-deployment/7588/> (accessed: 11.10.2021).
4. Non-lethal weapon - net gun [electronic resource]. URL: https://forum.guns.ru/forum_light_message/117/462938.html (accessed: 15.10.2021).

ФИЗИКА В ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 004.4:53

Применение программного комплекса «Laboratory Simulations» для исследования действия силы трения на криволинейной Траектории

Мирошниченко Е.В.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Курчатова, 7 г. Севастополь, 299015,
Россия evgenijamir@50gmail.com

Статья поступила 29.05.2023 г.; после доработки 30.05.2023 г.

Аннотация

В статье рассматриваются вопросы специфики проведения и организация учебного процесса дисциплины «Физический практикум», которая является продолжением курса общей физики «Лабораторный практикум». Рассматриваются особенности преподавания дисциплины студентам направления подготовки «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг». Актуализируется интерес вузовских преподавателей к тому, как можно увеличить и углубить компетенции студентов в будущем, за счёт изучения дисциплины «Физический практикум».

Ключевые слова: сила трения, трение скольжения, лабораторный практикум, второй закон Ньютона

Application of the software package "Laboratory Simulations" to study the action of the friction force on a curvilinear trajectory

Miroshnichenko E.V.

FGAOU VO Sevastopol State University, Kurchatov, 7, Sevastopol, 299015, Russia,
evgejamir@50gmail.com

Received 29.05.2023 y.; received in final form 30.05.2023 y.

Annotation

The article discusses the specifics of the conduct and organization of the educational process of the discipline "Physical Practicum", which is a continuation of the general physics course "Laboratory practice". The features of teaching the discipline to students of the direction of training "Atomic stations" are considered. The interest of university teachers in how it is possible to increase and deepen the competence of students in their field of activity in the future by studying the discipline "Physical practicum" is actualized.

Keywords: friction force, sliding friction, laboratory practice, Newton's second law

Введение

Перспективы развития атомной энергетики диктует повышение требований технической грамотности молодого специалиста. Умение выявлять и решать самостоятельно проблемы на

производстве способность анализировать большие объемы информации, умение организовать свою профессиональную деятельность.

Исходя из актуальности вышеперечисленного, перед учебными заведениями возникают новые задачи. Обучаемый должен освоить со-

временные технические средства, а задача преподавательского коллектива организовать процесс обучения таким образом, чтобы развить его познавательный интерес, интеллектуальные и творческие способности. Использование компьютера в качестве эффективного средства обучения существенно расширяет возможности педагогических технологий. Компьютерный эксперимент, позволяет представить некоторые явления макромира и микромира, т.к. и отдельные явления, изучаемые в курсе физики, которые невозможно наблюдать в реальной жизни и, тем более, воспроизвести экспериментальным путем в физической лаборатории [1].

Постановка задачи

Автор предлагает разобрать вопрос использование компьютера в качестве эффективного средства обучения организации учебного процесса дисциплины «Физический практикум», на примере проведения лабораторной работы с использованием программного комплекса «Laboratory Simulations».

Основная часть

В курсе общей физики технических вузов при изучении действия силы трения скольжения преподаватели рассматривают, как правило, ситуации, когда поверхность, по которой скользит тело, является плоской. Причина этого в том, что при движении тела по плоской поверхности сила трения скольжения постоянная. Это многое упрощает – например, определение работы силы трения. В общем случае эта работа равна

$$A = \int_1^2 F_{\text{тр.}\ell} d\ell.$$

Если сила трения постоянна, то её можно вынести из-под интеграла, и тогда

$$A = F_{\text{тр.}\ell} \ell = F_{\text{тр.}} \ell \cos \alpha = \mu N \ell \cos \alpha, \quad (1)$$

где ℓ – длина пути, пройденного телом, N – сила реакции поверхности, α – угол наклона поверхности к горизонтальной плоскости, μ – коэффициент трения.

Считая поверхность скольжения плоской, преподаватели могут без излишне громоздкой математики изложить студентам основные особенности силы трения скольжения. Усвоив материал, студенты в других специальных курсах или уже после окончания вуза смогут применить полученные знания в реальной ситуации, где поверхность – криволинейная.

Тем не менее, очень ценно уже в курсе общей физики как-то затронуть проблему скольже-

ния тела по криволинейной поверхности. Тратить на это лекционное время вряд ли целесообразно, но можно предложить студентам выполнить соответствующую лабораторную работу. И такая лабораторная работа есть, её разработали сотрудники национального исследовательского Томского политехнического университета (НИ ТПУ). Работа входит в программный комплекс Laboratory Simulations [3]. Этот комплекс содержит более 20 компьютерных моделей физических явлений и процессов, изучаемых в курсе общей физики технических, классических и педагогических университетов. В 2017 году Севастопольский государственный университет (СевГУ) приобрёл в НИ ТПУ комплекс Laboratory Simulations, и к настоящему времени преподаватели кафедры «Физика» СевГУ запустили в эксплуатацию уже 40 лабораторных работ по общей физике на базе Laboratory Simulations. Упомянутая лабораторная работа выполняется на модели установки, показанной на рисунке 1.

В твёрдый шарик продета по его диаметру стальная спица (направляющая), по которой шарик может скользить. Направляющая имеет два участка: прямолинейный горизонтальный длиной L и круговой вертикальный радиусом R . На горизонтальный участок направляющей надета пружина, один конец которой закреплён в вертикальной стенке, там же закреплена и направляющая. Второй конец пружины свободен. Если к этому концу подвести шарик, а затем с помощью курка сжать пружину, то после спуска курка пружина распрямляется и разгоняет шарик.

После отделения от пружины шарик продолжает скользить по направляющей и постепенно под действием силы трения скольжения и силы тяжести (на круговом участке) останавливается. Если остановка происходит на круговом участке, то после остановки шарик скатывается вниз по правой стороне направляющей, разгоняется и затем – уже на прямолинейном участке – снова останавливается.

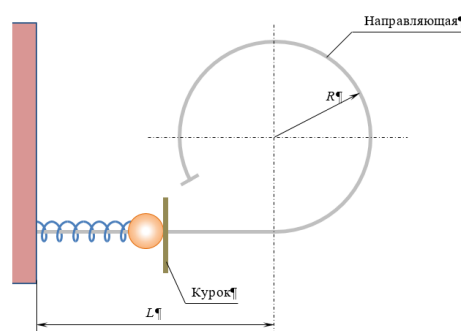


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Если шарик при спуске курка получает от пружины достаточно большую скорость, то он может достигнуть верхней точки окружности и затем скатиться вниз по левой стороне направляющей. В конце её находится ограничитель, останавливающий шарик.

В методическом пособии для данной лабораторной работы [2] (в теоретической части) студентам достаточно подробно разъясняется, какие силы действуют на шарик в процессе движения, что иллюстрируется схемой, показанной на рисунке 2, где (τ, n) – это вращающаяся декартова система координат, φ – угол полярной системы координат.

Применение Второго закона Ньютона позволяет получить следующее дифференциальное уравнение движения шарика на круговом участке траектории:

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \mu \left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 + \frac{g}{R}(\mu|\cos\varphi| + \sin\varphi) = 0.$$

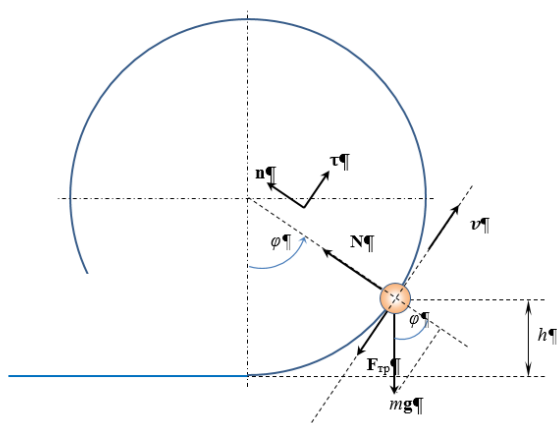


Рис. 2. Силы, действующие на шарик на круговом участке

Из этого уравнения следует, в частности, один важный количественный вывод: решение уравнения, то есть функция $\varphi(t)$, зависит от трёх параметров. Ими являются коэффициент трения μ , радиус круговой направляющей R и скорость шарика в начале его движения по кругу v_0 . От массы шарика функция $\varphi(t)$ не зависит. Данный факт приводит к простому практическому выводу: максимальная высота подъёма шарика $h_{\max}$ и время подъёма шарика на максимальную высоту T не зависят от массы шарика. Данный факт нетрудно проверить экспериментально, проведя серию опытов с шариками разной

массы¹. Это – естественная и вполне понятная первая задача, предлагаемая студентам.

Вторая задача связана с исследованием работы силы трения A .

Работа постоянной силы трения на горизонтальном участке A_1 следует из формулы (1):

$$A_1 = -\mu mg(L - \ell_0 + \Delta x), \quad (2)$$

где ℓ_0 – длина недеформированной пружины, а Δx – начальное сжатие пружины.

Для нахождения работы силы трения на круговом участке A_2 надо вычислять интеграл. В методическом пособии [1] студентам продемонстрировано, как это сделать, и получен следующий результат:

$$A_2 = -\mu m R [I + g(2 - \sin\varphi_{\max})], \quad (3)$$

где $\varphi_{\max}$ – полярный угол шарика в верхнем положении шарика, а I – это интеграл

$$I = \int_0^T \omega(t)^3 dt = \int_0^T \dot{\varphi}(t)^3 dt \quad (4)$$

Так как функция $\varphi(t)$ от массы шарика не зависит, то и интеграл I тоже от массы шарика не зависит. Тогда из (3) следует, что работа A_2 работы силы трения пропорциональна m . Из (2) следует, что и работа A_1 тоже пропорциональна m . Таким образом, работа силы трения на всём пути движения шарика от старта до верхней точки A пропорциональна массе шарика m . Экспериментальная проверка этого факта и есть вторая задача, которая предлагается студентам. Для измерения полной работы силы трения интересно найти способ измерения, не связанный с формулами (2) и (3). Этот способ есть, он основан на законе сохранения энергии, из которого следует, что

$$A = mgh_{\max} - \frac{k(\Delta x)^2}{2} \quad (5)$$

В лабораторную работу можно включить ещё одно задание: экспериментальную проверку формулы (3) для работы силы трения на криволинейном (круговом) участке пути. Это более трудное задание, оно требует, в частности, измерения значения интеграла I . Для этого надо получить экспериментальную зависимость $\varphi(t)$, затем путём численного дифференцирования получить экспериментальную зависимость $\dot{\varphi}(t)$ и, наконец, путём численного интегрирования получить значение интеграла I . Давать такое задание целесообразно наиболее способным студентам, которые хорошо освоили базовые знания и проявляют интерес к исследованиям.

¹ Важно только обеспечить, чтобы во всех опытах была одна и та же начальная скорость шарика v_0 .

Выводы

Знания полученные методом исследования или с элементами исследования, запоминаются лучше и формируют у будущих инженеров желание заниматься научной деятельностью.

Автор считает, что перспективе, использование компьютерных программ, в процессе обучения студентов, сможет совершить качественный скачок в повышении эффективности педагогических технологий используемых в процессе подготовки молодого специалиста.

Список литературы

1. А.Г. Рипп Особенности организации дисциплины «Физический практикум» для студентов направления «Атомные станции» / О.В. Матузева, Е.В. Мирошниченко, В.В. Довгаленко, С.А.Чернявская// Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАО ВО СевГУ, 2020. – Т. 6, № 4, С. 33 – 37.
2. А.Г. Рипп, Е.В. Мирошниченко Скольжение шарика по круговой направляющей: Учебное пособие по общей физике – Севастополь: Изд-во Севастопольского государственного университета, 2018. – 21 с.
3. А.Г. Рипп, В.Д. Дюло Особенности организации и выполнения виртуальных лабораторных работ по физике / Материалы Двадцать пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-25, Крым) ВНКСФ-25 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону – Крым: Изд-во АСФ России, 2019.
4. Е.В. Мирошниченко, С.А. Слива Экспериментальные исследования работы силы трения на криволинейной траектории. / Материалы Двадцать пятой Всероссийской научной конференции студентов-физиков и молодых ученых (ВНКСФ-25, Крым) ВНКСФ-25 – Екатеринбург – Ростов-на-Дону – Крым: Изд-во АСФ России, 2019.

References

1. A.G. Ripp Features of the organization of the discipline "Physical Practicum" for students directions "Nuclear power plants" / O.V. Matuzaeva, E.V. Miroshnichenko, V.V. Dovgalenko, S.A.Chernyavskaya// Power plants and technologies: scientific journal. - Sevasto-pol: FGAO IN SevSU, 2020. – Vol. 6, No. 4, pp. 33-37.
2. A.G. Ripp, E.V. Miroshnichenko Sliding a ball along a circular guide: Textbook on general physics – Sevastopol: Publishing House of Sevastopol State University, 2018. - 21 p.
3. A.G. Ripp, V.D. Dyulo Features of the organization and performance of virtual laboratory work in physics / Materials of the Twenty-fifth All-Russian Scientific Conference of Physics Students and Young

Scientists (VNKSF-25, Crimea) VNKSF-25 – Yekaterinburg– Rostov-on-Don– Crimea: Publishing House of the ASF of Russia, 2019.

4. E.V. Miroshnichenko, S.A. Sliva Experimental studies of the friction force on a curved trajectory. / Materials of the Twenty-fifth All-Russian Scientific Conference of Physics Students and Young Scientists (VNKSF-25, Crimea) VNKSF-25 - Yekaterinburg – Rostov-on-Don - Crimea: Publishing House of the ASF of Russia, 2019.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.
Принимаются статьи на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована и содержать:

- постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

К статье должно прилагаться:

- два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, первый экземпляр, подписанный всеми авторами;
- оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
- рецензия, подписанная доктором наук или кандидатом наук;
- информация об авторах статьи (заголовок статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты).

ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ

Статья должна представляться также в электронном виде файлом, подготовленном в текстовом процессоре MS Word в режиме разметки страницы. Файл следует сохранять с расширением *.doc(или *.rtf) без макросов.

Имя файла должно начинаться фамилией контактирующего автора на латинице. Основной текст набирается шрифтом «Times New Roman» (11 пт) через интервал с автоматической расстановкой переносов в две колонки с расстоянием между ними 10 мм.

Ширины верхнего поля – 27 мм, нижнего – 23 мм, левого и правого – 18 мм, первый ряд — отступ 0,75 см.

Название статьи – шрифт 16 пт, ФИО – шрифт 14 пт. Сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, список литературы – шрифт 10 пт.

Рисунки выполняются в графических редакторах и (или) процессорах (Paint, PhotoShop, CorelDraw и т.п.) в с разрешением 300dpi.

Шаблон статьи и требования по ее оформлению приведены на сайте СевГУ: <https://www.sevsu.ru/>.

Статьи, не удовлетворяющие шаблону и требованиям к оформлению, рассматриваться не будут.

Более детальную информацию можно получить в редакции журнала:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация. E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru, телефон. +7(8692) 71-01-64.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Выпуск № 2, Том 9 2023 г.

16+

Рубрики в соответствии с номенклатурой научных специальностей:

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами

05.14.01 Энергетические системы и комплексы

05.14.03 Ядерные энергетические установки, включая проектирование

05.14.08 Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

05.26.05. Ядерная и радиационная безопасность

Адрес редакции:

299015, г. Севастополь, ул. Курчатова, 7.

Телефон редакции: 8(692) 710164

<https://old.sevsu.ru/nauka/pechat-izdaniya/item/1272-njeut>

e-mail: nauchnyyzhurnal@mail.ru

Отпечатано в издательстве СевГУ.

Публикуемые материалы прошли обязательную процедуру рецензирования и экспертного отбора. Авторы опубликованных материалов несут полную ответственность за подбор и точность приведенных фактов, цитат, данных, имен собственных и прочих сведений.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнение редакционной коллегии может не совпадать с позицией авторов статей. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Учредитель и издатель:

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33. Севастополь, 299053.

№ рег. СМИ: ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

Главный редактор: Якимович Борис Анатольевич

Подписано к печати 08.06.2023. Заказ 24/23. Дата выхода в свет: 30.06.2023. Тираж 65 экз. Цена: Бесплатно. Формат 60×84/8. Бумага офсетная. Объем усл. печ. л. 17,15.

Севастополь, 2023