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. 8 № 1**

**Севастополь**
**2022**

**Э 651** ISSN 2413-5526
**УДК 621.311**

**Э 651** **Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2022. – Т. 8. - № 1. – 172 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.

**Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:**

*Качур С.А*. (главный редактор), д.т.н., доцент;
*Омельчук Ю.А.*(заместитель главного редактора), к.х.н., доцент;
*Черкашина Н.И.*(ответственный секретарь), к.т.н., доцент;
*Сафонов В.А.,* д.т.н., профессор; *Пухлий В.А.,* д.т.н., профессор;
*Пучков В.Н.,* д.т.н., профессор; *Акимов А.М*., д.т.н., профессор;
*Федоровский К.Ю.,* д.т.н., профессор; *Олейников А.М*., д.т.н., профессор;
*Тимощенко А.И*., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б*., д.т.н., профессор;
*Высоцкий В.Е.*, д.т.н., профессор; *Краснодубец Л.А.,* д.т.н., профессор;
*Прибатурин Н.А.,* д.т.н., профессор; *Кирияченко И.А.,* к.т.н., профессор;
*Магдыч Е.А.,* к.т.н., доцент; *Федорова С.А.,* к.пед.н., доцент;
*Мирошниченко С.Т.*, к.т.н., доцент; *Свириденко И.И.,* к.т.н., доцент;
*Матузаев К.Б.,* к.т.н., доцент; *Скидан А.А.,* к.т.н., доцент;
*Углов А.В*., к.т.н., доцент; *Шайтор Н.М*., к.т.н., доцент;
*Ерофеев В.А*., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И*., к.т.н., доцент;
*Гусева Е.В.,* к.т.н., доцент; *Щекатурина Т.Л.,* д.х.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», 2022**

# СОДЕРЖАНИЕ

**Тепловые и ядерные энергетические установки** **7**

*Браславский Ю.В., Сукрушев А.В., Фролова А.Н.* Применение систем виброшумовой диагностики для ядерных энергетических установок с ядерными реакторами типа ВВЭР **7**

*Браславский Ю.В., Сукрушев А.В., Фролова А.Н.* Анализ «малых» инцидентов энергетических установок с турбинами большой мощности и их влияние на эксплуатацию 17

*Качур С.А., Шахова Н.В.* Локализация повреждений статора турбогенератора на основе акустических характеристик 25

*Фролова А.Н., Браславский Ю.В., Сукрушев А.В., Пичугова Л.Н.* Неразрушающие методы анализа ядерных материалов в области учета и контроля 30

*Шаповаленко В.В.* Реализация замкнутого ядерного топливного цикла в России 38

**Электротехнические комплексы и системы** **43**

*Гусева Е.В., Бордан Д.Ф., Власов Н.А., Тиман Д.И.* Использование энергетического потенциала возобновляемых источников для обеспечения потребностей Крымского региона 43

*Муровский С.П., Гусева Е.В., Лепеха О.Г., Тиман Д.И.* Возможности модернизации фотоэлектрических электростанций 50

*Пронина А.К., Путилин К.П., Конева С.А.* Переходные процессы пуска асинхронного двигателя от электрической сети ограниченной мощности 59

*Титаренко О.Н., Шестернева А.М.* Обеспечение надежного функционирования единой энергетической системы 65

*Шестернёва А.М., Титаренко О.Н., Скакун Г.С.* Актуальность замены действующей отопительной котельной на теплонасосную установку 71

**Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии** **78**

*Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Тиман Д.И., Бордан Д.Ф., Нашев Р.А.* Использование энергосберегающих технологий для системы электрического освещения города на основе фотоэлектрических преобразователей 78

*Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Тиман Д.И., Жиганов И.Г., Гхашим М* Оптимизации режимов распределения нагрузки в совмещённой системе с возобновляемыми источниками энергии 84

*Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Власов Н.А., Березняк В.А., Гхашим М.* Повышение эффективности работы солнечных и ветровых электростанций за счет применения накопителей энергии 90

*Кувшинов В.В., Сперанский М.Ю., Смокталь Н.Н., Жиганов И.Г., Бордан Д.Ф.* Система электроснабжения жилого комплекса на базе преобразователей солнечной энергии с возможностью генерации электрической энергии в общую энергосеть 96

*Кувшинов В.В., Сперанский М.Ю., Березняк В.А., Власов Н.А., Лавренчук А.А.* Исследование эффективности работы фотоэлектрических панелей, используемых для работы на солнечных электростанциях и для обеспечения автономных потребителей 106

*Шайтор Н.М., Горпинченко А.В.* Безударный пуск асинхронных электроприводов пофазным подключением двигателя к сети 115

**Информационные технологии в энергетике** **120**

*Антонова-Дружинина А.О., Смычков Е.Е., Смычков А.Е., Сагалаев А.В., Луцышен В.А.* Возможности защиты от атак с подбором паролей на основе машинного обучения угроз 120

*Смычков А.Е., Смычков Е.Е., Контылева Е.А, Пелись В.В., Сагалаев А.В.* Методы интеллектуального анализа данных для решения задач информационной безопасности 125

**Химические технологии** **130**

*Акимов А.М., Котельникова С.А.* Основные факторы, определяющие окислительную активность азотной кислоты при окислении диоксида урана в сернокислых растворах 130

*Акимов А.М., Федорова С.А., Магдыч Е.А.* К вопросу применения малых модульных реакторов 134

*Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Глушкова Е.В., Дюдяев И.А., Майорова В.В.* Исследование влияния нейтронного облучения на физико-механические свойства материалов 138

*Шевелев Д.В., Безотосный С.С., Григорьева В.Н., Тишков В.Ф., Свириденко И.И.* Моделирование СВЧ плавления радиоактивного битумного компаунда 142

**Экологическая безопасность** **153**

*Городецкая А.М., Тищенко Т.Н., Заблоцкая Е.В., Дербасова Н.М., Гавриш О.П.* Агрохимическая оценка плодородия почв ООО «Севастопольский» 153

*Магдыч Е.А., Ведищева О.В., Савенко Е.М., Юркова Т.А.* Исследование сорбционных свойств нанопорошка к ионам тяжелых металлов в динамическом и статическом режимах сорбции 158

*Тищенко Т.Н., Горблянская А.С., Городецкая А.М., Дербасова Н.М., Гавриш О.П.* Анализ распределения тяжелых металлов в почвах ООО «Севастопольский» 163

# CONTENTS

**Thermal and nuclear power plant** **7**

*Braslavskiy Y.V., Sukrushev A.V., Frolova A.N.* Application of vibronoise diagnosis systems for nuclear power installations with nuclear reactors of PWR type **7**

*Braslavskiy Y.V., Sukrushev A.V., Frolova A.N.* Analysis of "small" incidents of power plants with high-power turbines and their impact on operation 17

*Kachur S.A., Shakhova N.V.* Localization of damage to the turbine generator stator based on acoustic characteristics 25

*Frolova A.N., Braslavskiy Y.V.,.Sukrushev A.V,.Pichugova L.N.* Non-destructive methods of nuclear materials analysis in the field of accounting and control 30

*Shapovalenko V.V.* Implementation of the closed nuclear fuel cycle in Russia 38

**Electrotechnical complexes and systems** **43**

*Guseva E.V., Bordan D.F., Vlasov N.A., Timan D.I.* Use of energy resources from related sources to ensure the security of the Crimean region 43

*Murovskiy S.P., Guseva E.V., Lepekha O. G., Timan D.I.* Opportunities for modernization of photoelectric power plants 50

*Pronina A.K., Putilin K.P., Koneva S.A.* Transient processes of starting an asynchronous motor from an electrical network of limited power 59

*Titarenko O.N., Shesterniova A.M.* Ensuring reliable functioning of the unified energy system 65

*Shesterneva A.M., Titarenko O.N., Skakun G.S.* The relevance of replacing the existing heating boiler house with a heat pump unit 71

**Alternative and renewable energy sources** **78**

*Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Timan D.I., Bordan D.F., Nashev R.A.* The use of energy-saving technologies for the city's electric lighting system based on photovoltaic converters 78

*Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Timan D.I., Zhiganov I.G., Ghashim M.* Improving the efficiency of solar and wind power plants through the use of energy storage 84

*Kuvshinov V.V., Kakushina E G., Vlasov N.A., Bereznyak V.A., Ghashim M.* Improving the efficiency of solar and wind power plants through the use of energy storage 90

*Kuvshinov V.V., Speranskiy M.Yu., Smoktal N.N., Zhiganov I.G., Bordan D.F.* The power supply system of the residential complex based on solar energy converters with the possibility of generating electric energy into the general power grid 96

*Kuvshinov V.V., Speransky M.Yu., Bereznyak V.A., Vlasov N.A., Lavrenchuk A.A.* Study of the efficiency of photovoltaic panels used to work at solar power plants and to provide autonomous consumers 106

*Shaytor N.M., Gorpinchenko A.V.* Shockless start of asynchronous electric drives by phase connection of the motor to the mains 115

**Information technologies in the energy sector** **120**

*Antonova-Druzhinina A.O., Smychkov E.E., Smychkov A.E., Sagalaev A.V., Lutsyshen V.A* Protection against machine learning-based password guessing attacks 120

*Smychkov E.E., Smychkov A.E., Kontyleva E.A., Pelis V.V., Sagalaev A.V.* The use of data mining methods in information security solutions 125

**Chemical technology of nuclear power plants 130**

*Akimov A.M., Kotelnikova S.A.,* The main factors determining the oxidative activity of nitric acid during the oxidation of uranium dioxide in sulfuric acid solutions 130

*Akimov A.M., Fedorova S.A., Magdych E.A.* On the issue of using small modular reactors 134

*Korneeva, N.K., Pichugova, L.N., Glushkova E.V., Dyudyaev I.A., Mayorova V.V.* Study of the effect of neutron irradiation on the physical and mechanical properties of materials 138

*Shevelyov D.V., Bezotosnyi S.S., Grigoryeva V.N., Tishkov V.F., Sviridenko I.I.* The modeling of MW melting of radioactive bitumen compound 142

**Environmental Safety 153**

*Gorodetskaya A.M., Tishchenko T.N., Zablotskaya E.V., Derbasova N.M., Gavrish O.P.* Agrochemical assessment of soil fertility LLC "Sevastopol" 153

*Magdych E.A., Vedishcheva O.V., Savenko E.M., Yurkova T.A.* Investigation of sorption properties of nanopowder to heavy metal ions in dynamic and static sorption modes 158

*Tishchenko T.N., Gorblyanskaya A.S., Gorodetskaya A.M, Derbasova N.M., Gavrish O.P.* Analysis of the distribution of heavy metals in the soils of LLC "Sevastopolsky" 163

## ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.58

# Применение систем виброшумовой диагностики для ядерных энергетических установок с ядерными реакторами типа ВВЭР

Ю.В. Браславский, А.В. Сукрушев, А.Н. Фролова
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,г. Севастополь, 299053, Россия , ANFrolova@sevsu.ru*

Статья поступила 07.02.2022 г.; после доработки 09.02.2022 г.

***Аннотация***
*Проанализированы возможности мониторинга технического состояния ядерных энергетических установок с реакторами типа ВВЭР системами виброакустической диагностики.*

*Ключевые слова:*модель виброакустическая диагностика; методы эксплуатационного мониторинга и неразрушающего контроля на атомных станциях; обслуживание оборудования АЭС.

# Application of vibronoise diagnosis systems for nuclear power installations with nuclear reactors of PWR type

Y.V. Braslavskiy, A.V. Sukrushev, A.N. Frolova
*Sevastopol State University, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia, , ANFrolova@sevsu.ru*

Received 07.02.2022 y.; received in final form 09.02.2022 y.

***Abstract***
*The possibilities of monitoring the technical condition of nuclear power plants with PWR type reactors by vibroacoustic diagnostic systems are analyzed*

*Keywords:* vibroacoustic diagnostics; methods of operational monitoring and non-destructive testing at nuclear power plants; maintenance of NPP equipment.

## Введение

Обеспечение надежной и безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС является одной из важнейших задач ядерной энергетики. Одним из мероприятий по обеспечению надежной и безопасной эксплуатации является эксплуатационный контроль показателей целостности и долговечности оборудования реакторных установок. Такой контроль, реализуемый через системы оперативной диагностики, дополняет традиционные виды освидетельствования технического состояния оборудования: входной и предэксплуатационный контроль, пусконаладочные испытания и измерения, неразрушающий контроль металла при ежегодных ревизиях оборудования, контроль за состоянием оборудования в ходе эксплуатации по технологическим параметрам. Стратегия раннего обнаружения аномалий находится в соответствии с общим подходом к обеспечению безопасности АЭС, так как позволяет снизить вероятность исходных событий аварии. Оперативная диагностика оборудования РУ выступает в качестве информационной составляющей автоматизированной системы контроля и управления энергоблоком, что повышает оперативность получения информации о причинах появления неисправности путем: обнаружения и локализации дефектов; анализа причин отказов;

прогнозирования технического состояния оборудования.

## Постановка задачи

На основе современных методов выделения диагностической информации из различных шумовых сигналов возможно диагностирование оборудования РУ для выявления на ранней стадии механических дефектов или аномальных изменений условий его закрепления с выходом на причину той или иной аномалии, а также оптимизация объема ремонтных работ для определения фактического вибросостояния оборудования. Таким образом, разработка, создание и внедрение на АЭС системы виброшумовой диагностики, является актуальной задачей, направленной на обеспечение надежной и безопасной работы энергоблока, продление срока службы, переход к обслуживанию по фактическому состоянию.

Однако, для повышения безопасности и эксплуатационной надежности АЭС с РУ ВВЭР за счет применения системы виброшумовой диагностики (СВШД) для раннего диагностирования вибрационного состояния РУ с автоматической постановкой диагноза, необходимо провести ряд исследований, направленных на обобщение известных технических решений и методов обработки шумовых сигналов, адаптации их к объекту контроля и реализации в новой системе виброшумовой диагностики.

## Основная часть

В настоящее время на многих АЭС с РУ ВВЭР находятся в промышленной эксплуатации компоненты и программно-технические комплексы, в которых используются системы виброакустической диагностики. В качестве примеров, можно привести систему виброшумовой диагностики РУ ВВЭР-1000 (проект В-320) на блоке 3 Балаковской АЭС, систему контроля вибрации РУ ВВЭР-440 (проект (В-179) на блоках 3и 4 Нововоронежской АЭС, использование датчиков относительных перемещений на блоке 3 Балаковской АЭС, блоках 3 и 4 НВАЭС, 1 и 2 Кольской АЭС и т.д. Также, АЭС различных национальных энергетических компаний с ВВЭР комплектуются средствами виброшумовой диагностики: контроля вибрации (блок 1 РУ В-446 АЭС «Бушер»); виброшумовой диагностики (блоки 1 и 2 РУ В-428 АЭС Тяньвань). Отметим характерные особенности некоторых из них.

Виброшумовой контроль, который применялся на АЭС Greifswald. Два вибрационных инцидента на АЭС Greifswald с ВВЭР-440 (проект В-230) стимулировали развитие виброшумового анализа в ГДР. В 1972 - 1976 гг. происходили аномальные вибрации аварийных регулирующих кассет (АРК), в 1985 – 1986 гг. фиксировались аномальные вибрации шахты [1]. В первом случае вибрации были столь велики, что в местах соударения дистанционирующих решеток (ДР) с чехлом АРК появились отверстия в чехле, и, как выяснилось при ремонтных работах, в некоторых АРК топливная и поглощающая части оказались разъединенными. После установления вибрационной причины дефекта конструкцию топливной части АРК изменили для уменьшения расхода теплоносителя (ТН) через нее. Для контроля вибраций впервые на ВВЭР-440 были установлены внутризонные нейтронные детекторы прямого заряда (ДПЗ). На российских АЭС первые блоки с ВВЭР-440 эксплуатировали без ДПЗ, только спустя некоторое время ДПЗ были введены в проект, ими стали оснащать 11 рабочих кассет (РК), расположенных рядом с АРК (для проекта В-230) и 36 РК для проекта В-213.

В 1977 г. на базе Института ядерных исследований (г. Россендорф, ГДР) была организована диагностическая группа. Этот институт начал шумовые исследования на АЭС Greifswald еще в 1974 г., а в 1975 г. в нем была разработана и внедрена первая опытная СВШК.

Аномальные вибрации шахты на АЭС Greifswald (1985 - 1986 гг.) обнаружились сразу после ППР, так как размах флуктуаций нейтронного потока вырос на порядок по сравнению с тем же параметром в предыдущем топливном цикле. Далее, в течение всей кампании среднеквадратическое значение (СКЗ) внезонного нейтронного шума оставалось примерно постоянным. После выведения блока в ремонт износы нижних шпонок шахты, прижимных трубчатых элементов и поверхностей лабиринтного уплотнения были очень значительны, что потребовало существенных затрат на их восстановление.

Немецкие исследователи выполнили большой объем расчетных и экспериментальных работ по шумовой диагностике ВВЭР-440 [2,3]. Длительное наблюдение за внезонными нейтронными шумами на четырех блоках АЭС Greifswald позволило немецким исследователям установить диагностические пороги для контроля вибраций шахты по внезонному нейтронному шуму:

Еще до широкого распространения СВШК фирмы Siemens на АЭС Greifswald построили

опытную СВШК [4] с датчиками пульсации давления ДПЗ, датчиками внезонного нейтронного шума в двух уровнях и акселерометрами. Акселерометры устанавливали на крышке реактора, корпусе реактора и его верхнем блоке. На корпусе реактора акселерометры размещали в труднодоступных местах - на днище корпуса и на горизонте лабиринтного уплотнения. В результате были разработаны уникальные методы контроля вибраций. Например, вибрацию шахты контролировали по взаимным спектральным характеристикам сигналов ионизационной (ИК) и акселерометра, установленного на горизонте лабиринтного уплотнения (Рис. 1).

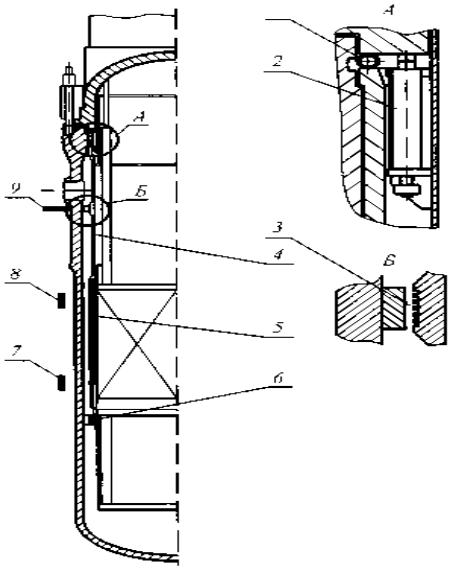



**Рис. 1.** Упрощенная схема датчиков и элементов ВКУ ВВЭР-440, определяющих вибрации шахты: 1 — трубчатый сегмент; 2 — пружинный блок; 3 —- лабиринтное уплотнение; 4 — выгородка; 5 — шахта; 6 — вибрагасители; 7 — нижняя И К; 8 верхняя ИК; Р— акселерометр

Взаимосвязь данных сигналов объясняли тем, что при отклонении шахты от равновесного положения, как известно, из меняется поток нейтронов утечки на ИК, одновременно повышается уровень акустического шума вследствие увеличения паразитных протечек ТН через лабиринтное уплотнение (что и явилось предметом новизны).Другой пример совместного использования акустического сигнала и сигнала нейтронного детектора приведен в работах [2,3]. Вибрации АРК, сопровождающиеся ударами о чехол, фиксировались акселерометрами, установленными на верхнем блоке (на направляющих трубах АРК), и ДПЗ, расположенными в соседней РК Корреляции этих сигналов оказались крайне слабыми.

Были предложены нетрадиционные методы анализа нестационарных случайных процессов. Обрабатывали не всю зарегистрированную реализацию нейтронных шумов (НШ), а только те ее фрагменты, которые по времени совпадали с ударами, обнаруженными по акустическому каналу. При этом применяли не прямой акустический сигнал, а его огибающую. При этом, акустические импульсы являлись своего рода синхропмпульсами, запускающими регистрацию НШ в малом временном интервале.

После статистической обработки НШ в большом числе таких временных интервалов, получали диагностические признаки, чувствительные к соударениям АРК. Тщательно продуманное расположение нейтронных датчиков и акселерометров позволило немецким исследователям разработать методы оценки траектории АРК и шахты. Было экспериментально доказано, что вибрации и АРК и шахты сопровождаются соударениями. В АРК удары зафиксированы на горизонте шарнирного соединения поглощающей и топливной частей, вибрации шахты сопровождаются соударениями в нижнем шпоночном узле. Удар резко меняет траекторию шахты, например, он может скачкообразно изменить направление движения шахты на противоположное.

Такие точки траектории несложно обнаружить, а их статистика (например, частота ударов) является диагностическим признаком. Для шахты частота соударений характеризует износ шпонок, для АРК - скорость теплоносителя как результат перераспределения интегрального расхода ТН между РК АРК и межкассетным пространством.

В 80-е годы фирма Siemens построила СВШК SUS, которая вначале была внедрена на немецкие PWR различных конструкций, а затем — на несколько блоков АЭС с ВВЭР 440, причем принципы ее построения существенным образом не изменялись от одной продажи к другой. Можно считать, что с этого времени виброшумовой контроль перестал реализовываться только опытными системами, а вышел и на промышленный уровень.

Впервые система SÜS за рубежом была внедрена на АЭС Чехословакии (в Чехии на АЭС Дукованы, в Словакии на АЭС Богунице), а затем на двух блоках КоАЭС и двух блоках НВАЭС с ВВЭРР-440 (проект В-230) [5,6]. В работе [7] можно найти полный список всех систем локальной диагностики, поставляемых фирмой Siemens. Стандартная конфигурация датчиков

SÜS изображена на рис. 2.

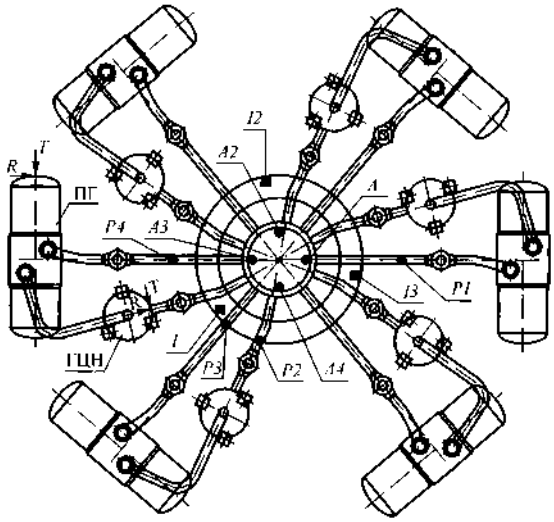



**Рис. 2.** Размещение датчиков системы SÜS для ВВЭР-440: I - ионизационная камера; Р - ДПД; Т - ДОП в тангенциальном направлении, R - ДОП в радиальном направлении; А – ДАП.

Датчики относительных перемещений (ДОП) установлены на основном оборудовании петель (главный циркуляционный насос ГЦН, парогенератор ПГ), датчик пульсаций давления (ДПД) - в холодных и горячих нитках, датчик абсолютных перемещений (ДАП) - на крышке корпуса, датчики относительных перемещений (ДОП) — двухфункциональные датчики, способные измерять как микроперемещения при вибрациях оборудования, так и макроперемещения оборудования петель в динамических режимах с изменением температуры ТН. Тем самым SÜS реализует еще одну важную функцию, тесно связанную с виброконтролем, - контроль перемещений опор основного оборудования при разогревах и расхолаживаниях.

Каналы измерения внезонного нейтронного шума SÜS в разных странах строились силами заказчика системы. Это обусловлено спецификой нейтронных измерений, состоящей в том, что как правило, свободные измерительные каналы отсутствуют, или предназначены только для отечественных ИК, или выставляются особые требования по габаритным размерам, температуре окружающей среды, чувствительности, ресурсу, обеспечению безопасной эксплуатации и т.п. Иными словами, здесь нет универсальных технических решений, пригодных для любого реактора по этому фирма Siemens отдавала их разработку заказчику.

ДПЗ и акселерометры в составе системы SÜS не предусматривались. Таким образом, методические наработки [2,3] нельзя было реализовать на базе детекторного оборудования SÜS. Строго говоря, фирма Siemens не поставляет алгоритмы вибродиагностики в составе системы SÜS. С помощью программного обеспечения, которое является принадлежностью SÜS, осуществляют сбор, хранение, первичную обработку сигналов и некоторые спектральные оценки. Собственно диагностика, которая строится на основе этих спектральных оценок, отсутствует. Этим и обеспечивается универсальность SÜS по отношению к различным типам реакторов. Перед каждым циклом измерений пользователь выбирает одно из двух множеств параметров спектральной оценки и заранее фиксирует не более 20 взаимных характеристик. Далее, в отсроченном режиме, на полученных автоспектральных плотностях мощности (АСПМ), взаимным спектральным плотностям мощности (ВСПМ) и функциях когерентности выбирают некоторые резонансы, параметры которых заносят в электронную таблицу. Средствами данного программного продукта исследуют тренды резонансов по накопленной предыстории.

Другими словами, от пользователя системы требуются знания по интерпретации резонансов и по представительности множества резонансов. И то, и другое на момент внедрения SÜS на ВВЭР-440 являлось предметом предстоящих исследований. Необходимую первичную информацию о вибрационных свойствах внутрикорпусных устройств (ВКУ) и ТВС можно было бы получить по результатам пусконаладочных испытаний (ПНИ), но во время пусков первых блоков ВВЭР-440 (более 30 лет назад) эти задачи в таком виде не ставились.

На АЭС Дукованы для интерпретации сигналов SÜS привлекали западногерманских специалистов [8]. После того как были по лучены авто- и взаимные спектральные характеристики сигналов ИК (рис. 3) с малым числом резонансных особенностей (специфика ВВЭР), они не представили каких-либо доказательств в пользу того, что в том или ином диапазоне частот доминируют колебания ТВС. Например, фазы, между сигналами всевозможных ИК, были либо нулевые, либо недостоверные. Эффектов противофазы свойственных вибрациям шахты и ТВС, выявлено не было.

Поиск доказательств был отложен до тех времен, когда к анализу помимо сигналов ИК можно будет привлечь и сигналы ДПЗ. Тем не менее опыт контроля с немецких PWR был меха-

нически перенесен на ВВЭР-440. Такое обобщение было оправдано тем, что массогабаритные параметры ТВС АЭС Obrigheim (PWR, 350 МВт) и ВВЭР-440 подобны.

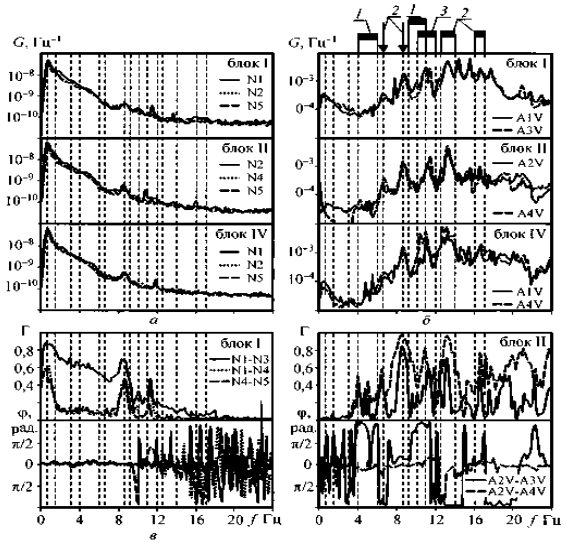



**Рис. 3.** Спектральные характеристики сигналов SÜS на АЭС Дукованы: а - АСПМ сигналов ИК, б - АСПМ сигналов ДАП, в - функции когерентности и фазы сигналов ИК, г - функции когерентности и фазы сигналов ДАП. Поддиапазоны доминирования вибрационных источников: 1 - ТВС; 2 - корпус реактора; 3 – шахта.

Кроме того, эта группа исследователей, обобщая виброшумовой опыт на немецких PWR разных конструкций пришла к выводу, что разные реакторы имеют очень близкие по расположению на оси частот вибрационные источники [9]. Например, как показано на рис. 4, диапазоны частот, где доминируют разные типы колебаний ТВС, одинаковы для трех разных конструкций немецких PWR. Они же совпадают по предположению авторов, с диапазонами частот вибраций ТВС ВВЭР 440:

- 3,0 Гц — вибрации ТВС с одним закрепленным концом;
- 6,0 Гц — вибрации ТВС с двумя закрепленными концами;
- 12,0 Гц — 2-я мода колебаний ТВС с двумя закрепленными концами.

В остальном сделаны правдоподобные выводы, совпадающие с результатами других исследований на Кольской АЭС и АЭС Paks, которые были уже опубликованы к тому времени:

- 6,6 Гц - вынужденные колебания корпуса, вызванные АСВ;
- 8,5 Гц - вертикальные колебания корпуса совместно с ВКУ ГЦН, «холодными» трубопроводами, ПГ на частоте АСВ;
- 13,5 Гц - маятниковые колебания совместно с корпусом
- 16 0 -17,0 Гц - вертикальные колебания корпуса.

На блоках АЭС Богунице проблема нейтронно-шумовых измерений решена созданием отдельной, параллельной SÜS, нейтронно-шумовой системы (Neutron Noise System), позволяющей регистрировать шумы различных сборок ДПЗ совместно с ИК [10]. Применение этой системы не только значительно расширило возможности SUS по контролю вибраций ВКУ и ТВС но и позволило оценивать поканальные расходы ТН.

Несомненно, системы SÜS и Neutron Noise System должны взаимодействовать, как впрочем, должны взаимодействовать и другие системы способные дать дополнительную информацию о вибросостоянии ВКУ и ТВС, такие, как система контроля вибраций ГЦН (MCP VMS) и система обнаружения освободившихся предметов (KÜS) В настоящее время локальные системы диагностики интегрируются в единую информационную систему с помощью надстройки программного обеспечения верхнего уровня.

Подход венгерских специалистов Центрального института физических исследований (KFKI) к виброшумовой диагностике [11-14] отличается от идеологии фирмы Siemens. Разработанная ими СВШК CARD базируется на

ИК, ДПЗ, термопар и ДПД. Кроме того, в качестве «внешних», накладных датчиков вибраций используются акселерометры. Эта система была поставлена на блок 1 Калининской АЭС с РУ ВВЭР-1000.

Уже из перечня измерительных каналов видно, что вибрации ВКУ и ТВС системой CARD контролируются лучше, а вибрации корпуса и основного оборудования петель — хуже по сравнению с системой SÜS. Кроме того с помощью системы CARD решают не только вибрационные задачи, но и теплогидравлические (шумовая оценка поканальных расходов и обнаружение недогретого кипения ТН оценка постоянных времени термопар) и нейтронно-физические (шумовая оценка температурного коэффициента реактивности ТКР).

Каждая из перечисленных выше функций системы представляет собой алгоритмически законченный и программно реализованный метод шумовой диагностики. Разработчики системы попытались автоматизировать многоступенча-

тый процесс шумовой оценки какого-либо параметра или даже получения диагноза.

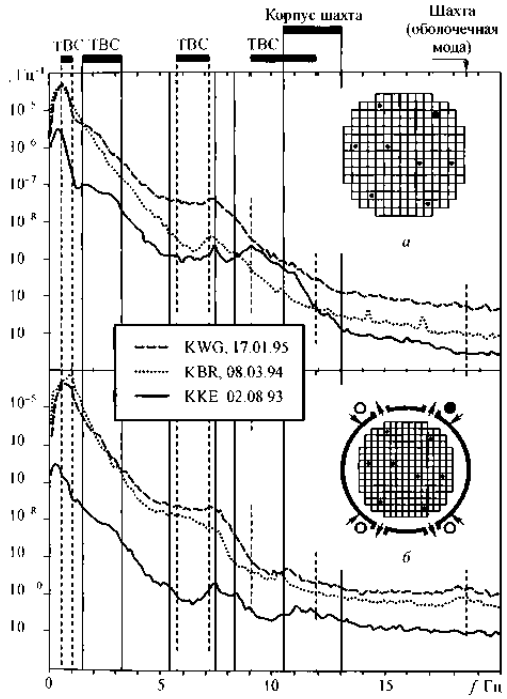



**Рис. 4.** АСПМ сигналов PWR (Германия): а - внутризонных ИК; б - внезонных ИК.

Например, оценка ТКР как отношение двух спектральных оценок с последующим интегрированием доведена до числа в физических единицах. Скорость ТН также оценивается в метрах в секунду. В отличие от SÜS, где выдаются только спектральные оценки, в которых надо вручную промаркировать резонансы, система CARD автоматически решает задачу контроля вибраций шахты с выдачей амплитуды вибрации в микрометрах. Кроме того, пользователь имеет возможность применить по своему усмотрению весьма сложные вычислительные процедуры, такие как многомерный авторегрессионый анализ.

Ориентация на штатные датчики, с одной стороны, удешевляет систему, но, с другой — накладывает ограничения на качество и объем измерений. Например, флуктуирующий компонент штатного сигнала может быть заинтегрирован, как, например, сигнал термопары, или закодирован с тем, чтобы противостоять помехам, как сигнал ИК. Доступ к штатным сигналам может ограничиваться из соображений безопасности или вследствие того, что проектом не предусмотрено их двухцелевое использование (сигналы ДПЗ).

Ориентация на акселерометры как на единственный тип датчиков вибраций в системе также имеет свои положительные и отрицательные стороны.

Положительные - унифицированность технических решений и низкая стоимость измерительных каналов.

Отрицательные - недостоверная низкочастотная область и невозможность построить на акселерометрах систему контроля тепловых перемещений оборудования, как это осуществляют при использовании ДОП.

По сообщениям венгерских специалистов трудно судить о том, какие именно СВШК установлены в данный момент на четырех блоках АЭС Paks [11-14]. Обладая несколькими группами поставщиков и значительным опытом эксплуатации шумовых диагностических систем, специалисты АЭС Paks с 1983 г. уже сменили три поколения СВШК. С 1997 г. на всех четырех блоках АЭС Paks производят регулярные шумовые измерения поканальных расходов и параметров вибросостояния ВКУ, РК и АРК.

В 1991 г. система CARD среди других локальных систем диагностики была поставлена на блоке 1 Калининской АЭС. В настоящее время, когда ее технические средства физически устарели или вышли из строя, можно сделать вывод о том, что в полной мере система не выполняла декларируемые функции.

Система не была введена в проект РУ, а значит, не подлежала обязательному регламентному обслуживанию. Не были получены качественные сигналы внезонных нейтронных шумов, поэтому объем вибродиагностики ВКУ и ТВС был сильно ограничен. В АСПМ сигнала ИК, начиная с 3 Гц доминировал паразитный собственный белый шум детектора. Не были получены качественные флуктуации сигналов терпопар (ТП), по этому оценка ТКР, для которой необходимы флуктуации сигналов ТП и ИК, была недостоверной.

Системе был выделен доступ всего к четырем каналам нейтронных измерений с ДПЗ, причем из семи ДПЗ одного канала нейтронных измерений (КНИ) были доступны всего четыре датчика. Таким образом, трудно было на брать статистку по вибрациям ТВС и сделать корректные вычисления поканальных расходов ТН. Система не выдавала информацию о вибрациях корпуса реактора.

Возможно, по этим причинам авторы системы сделали ошибочный вывод о частоте вибраций шахты [15]. Собственная частота коллективных вибраций ТВС 2,6 Гц была ими принята за собственную частоту вибраций шахты. Авторы системы не располагали информацией о

стендовых испытаниях ТВС результатах виброиспытаний ТВС и шахты при ПНИ, а также о результатах расчетных работ, в которых показано, что частота 2, 6 Гц обусловлена вибрациями ТВС СВШК на АЭС Темелин. На блоке 1 АЭС Темелин фирма Westinghouse разработала и ввела в проект (что существенно), изготовила и смонтировала СВШК до того, как начались ПНИ. В состав системы входят восемь ИК, штатные ДПЗ, термопары и акселерометры. Еще одно достижение фирмы Westinghouse состоит в том, что СВШК, как и все другие системы контроля и диагностики, уже являются элементами глобальной станционной сети, построенной по уникальной технологии ALLY [16,17]. Система ALLY представляет собой глобальную систему контроля и диагностики, функционирующую в многоуровневой распределенной компьютерной среде и интегрирующую все локальные диагностические ПТК с традиционными системами контроля управления и поддержки оператора. ALLY представляет возможности собственной организации информационных потоков между подсистемами, как в режиме реального времени, так и в режиме обмена на уровне архивов, что делает из совокупности локальных ПТК единую систему контроля и диагностики.

С помощью ALLY ПТК, обладающие существенно разными свойствами, объединяются в сетевую структуру типа источник информации - потребитель информации. Частотный диапазон сигналов системы обнаружения слабозакрепленных предметов (СОСП) — десятки килогерц, а системы оценки остаточного ресурса - доли герц, система СОСП — реального времени, а система виброшумовой диагностики — отсроченного анализа. Разные локальные системы могут функционировать под управлением разных операционных систем (WINDOWS, DOS UNIX и т.п.). С помощью ALLY осуществляется информационное обес печение как оперативного персонала на блочном щите управления (БЩУ), так и диагностического персонала на специально организованных автоматизированных рабочих местах. Технология ALLY дает широкие возможности для осуществления новых алгоритмов контроля и диагностики (мощная библиотека макроопераций) с учетом взаимной информации распределенной по различным ПТК. ALLY является экспертной системой, интеллектуальность которой обеспечивается качеством экспертной информации.

В то же время собственно СВШК обладает следующими недостатками:

- отсутствуют ДПД теплоносителя первого контура, т.е. в системе отсутствует прямая информация о значении сил, вынуждающих вибрации оборудования;
- отсутствуют датчики перемещений на ПГ, ГЦН и корпусе реактора, традиционно применяемые в других СВШД (в частности, в немецких и российских). Вместо них установлены акселерометры, качество сигналов которых сомнительно в области низких частот, где наблюдаются наиболее важные вибрационные эффекты. Кроме того, акселерометры не предназначены для измерения тепловых перемещений оборудования:
- отсутствие алгоритмов, выделяющих из многоканальных записей сигналов СВШД диагностические признаки вибросостояния шахты, ТВС корпуса реактора, основного оборудования петель и т. п.

В этой части СВШК АЭС Темелин во многом подобна системе SÜS.

Система SÜS-95 производства фирмы Siemens является модификацией систем применяющихся на АЭС Германии. SÜS-95, установленная на Балаковской АЭС, укомплектована измерительными каналами российского производства. По организационно-техническим причинам ее внедрение на Балаковской АЭС происходило очень медленно От уже рассмотренной СВШК SÜS, SÜS-95 отличается увеличенным числом ДОП в петлях и ДПД, установленными во всех горячих и холодных нитках четырех петель, а по существу, SÜS-95 унаследовала все преимущества и недостатки SUS.

Качество SUS-95 может быть значительно повышено, если эта система будет способна обрабатывать сигналы ДПЗ, будут получены качественные сигналы внезонных нейтронных детекторов в достаточном количестве; будет поставлено новое диагностическое программное обеспечение, в котором заложены характерные диагностические признаки свойственные ВВЭР-1000 вместе с диагностическими порогами; система будет обеспечена нормативно-технической документацией.

Важно, чтобы система обслуживалась (поддерживалось работоспособное состояние проводились периодические измерения) в штатном порядке.

В 2008 г. на блоке 4 Ровенской АЭС и блоке 2 Хмельницкой АЭС введены в опытную эксплуатацию системы вибродиагностики реакторной установки (СВДРУ), базирующиеся на измерениях одного типа [18,19]. С помощью двойного интегрирования сигналов акселерометров рассчитываются виброперемещения трубопроводов

ГЦК, корпуса реактора, коллекторов ПГ, соединительного трубопровода и трубопровода впрыска компенсатора давления (КД). Всего в СВДРУ 53 акселерометра. Существенная новизна этой системы состоит в том, что она имеет режим on-line. По всем 53 каналам непрерывно оценивается СКЗ и сравнивается с диагностическими уставками. Ожидается, что тренд СКЗ за кампанию выявит случаи «медленной» вибрационной деградации компонентов РУ. Неожиданными оказались редкие, кратковременные, но с большой амплитудой ударного типа всплески сигналов акселерометров при управлении технологическим процессом РУ. Кратковременное включение задвижек, регуляторов, клапанов. органов СУЗ и др. может вызвать увеличение контролируемого СКЗ в несколько раз. В отсроченном режиме традиционные СКВ анализируют только стационарные процессы, а ударное воздействие на ГЦК ими, как правило, не фиксируется.

## Заключение

1. Проведенный обзор существующих методов виброшумового анализа реакторных шумов для мониторинга оборудования РУ показывает, что эти методы широко внедряются зарубежными и отечественными исследователями в практику эксплуатации, проводятся исследования для создания новых методов ранней шумовой диагностики и систем виброшумового контроля на их базе.

2. Анализ использования СВШД показал, что зарубежные системы виброшумового контроля, установленные на АЭС разных национальных энергокомпаний, не в полной мере решают задачи ранней диагностики, так как недостаточно разработаны алгоритмы диагностирования, адаптированные к конкретным АЭС, и не в полном объеме используются сигналы различных типов датчиков, что ограничивает возможности систем по ранней диагностике.

3. Современные эксплуатируемые СВШД имеет несколько конкретных реализаций на разных АЭС, и даже на разных блоках одной АЭС. Любая диагностическая система имеет индивидуальные особенности, даже если это один и тот же тип системы диагностики, изготовленный одним и тем же предприятием в разное время (или одноименные, изготовленные разными предприятиями — здесь различия могут быть существенные). Следовательно, при разработке новых принципов построения СВШД и новых технических решений, реализованных при создании СВШД необходимо внедрять нормативно-закрепленные в практике эксплуатации АЭС проектные подходы, исключающие конкурентное влияние предприятий- разработчиков.

4. Многофункциональные системы диагностики должны строятся на нескольких источниках первичной информации; акустическое поле, радиационные поля (в том числе вне- и внутризонный нейтронный потоки), поле давлений теплоносителя, электрические параметры оборудования, виброперемещения, температуры сред и элементов оборудования, пульсации давления ТН, влажность воздуха в помещениях, геометрические характеристики (уровни ТН, пространственное положение оборудования) и т.д. В стандартном исполнении СВШД должна базироваться на использовании как минимум пяти типов датчиков: датчики абсолютных перемещений, датчики относительных перемещений, датчики пульсаций давления, ионизационные камеры, детекторы прямого заряда.

## Список литературы


1. Use of noise diagnostics for WWER-440/ A. Grabner, G. Grunwald, P. Liewers e.a.: Отчет / Институт ядерных исследований. Германия, Розендорф, 1998.
2. Detection of core barrel motion at WWER-440 type reacto s (SMORN V) / P. Schumann, P. Liewers W Schmitt, F P Weiss // Prog Nucl Energy ,1988. Vol. 21. P. 89-93.
3. Schumann P. Zur abschatzung des Einflusses von relativen Regelekement bewegungen bei anomalen Rectorkorbbew Egungen // Kernenergie. 1990 Bd. 33. S. 223-227.
4. Аркадов Г. В Павелко В. И., Усанов А. И. Виброшумовая диагностика ВВЭР. / Под ред. А. А. Абагяна. - М.: Энергоатомиздат. 2004 - 344 с.
5. PC-based vibration momtonng in KOLA nuclear power plant system and com missioning results / R. Geilhausen, V. Reznik, S. Titov, H.-J. Wehling // Proc of 24th informal meeting on reactor noise. June 23-25, 1993, Oybin.
6. Kunze U., Bechold B. New generation of monitoring systems with on-line diagnostics // Prog. Nucl. Energy. 1995. Vol. 29. N 3-4. P. 215-227.
7. Современные методы эксплуатационного мониторинга и неразрушающего контроля на атомных станциях. Материалы семинара Framatome ANP. 22-23 ноября 2002, Москва.
8. Results of noise analysis in the WWER 440 type nuclear power plant Ducovany (SMORN-VII) / J. Runkel, D. Stegemann, J. Fiedler e.a. // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. June 19—23 1995, Avignon, France. P. 78-86.
9. Vibration measurements in PWR Obrigheim by use of m-core accelerome ters / E. Laggiard, J. Fiedler,

J Runkel e.a. // Prog. Nucl. Energy. 1995 V. 29. P. 113-119.
10. Hrosso P., Maudry J., Korek J. Technical diagnostics of VI and V2 NPP at Bohunice (SMORN-VII) // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. June 19—23, 1995, Avignon, France. P. 561-571.
11. Hollo E., Siklossy P., Toth Z. Automated vibration monitoring system for WWER-440 nuclear power plant diagnostics and surveillance (SMORN-III) // Prog. Nucl. Energy. 1982. Vol. 9. P. 595-604.
12. Development and utilization of an automated reactor noise measuring and processing system / G. Por, S. Bende-Farkas, O. Glockler e.a. // A sym posium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI, May 19-24 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 - Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 18.01.
13. On-line diagnostic method for vibrational surveillance of PAKS NPP pn man' circuit equipment's / E. Hollo, P. Siklossy, L. Turi, S. Ratkai. // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI May 19—24, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 - Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 20.01.
14. Czibok T., Kiss G. Regular neutron noise diagnostics measurements at the Hungarian Paks NPP (SMORN-VIII) // Prog. Nucl. Energy. 2003. Vol. 43 N 1-4, P. 67-74.
15. Por G. Monitoring and diagnosis systems to improve NPP realiability and safety monitoring and diagnosis systems to improve nuclear power plant reliability and safety // Proc. of the specialists' meeting IAEA May 14-17 1996, Gloucester, UK. P. 33—39.
16. Kozlosky T., Lowenfeld S., Bauman D. Advanced plant information systems using intelligent monitoring and diagnostics and the ALLY. // Plant Monitoring and Diagnostics System, SMIRT Conference (Post Conference Seminar), 1993, Konstanz, Germany.
17. Jakes M. Monitoring and diagnostic system of NPP Temelin operational monitoring of primary circuit components // Regional Workshop IAEA 28-31 января 2003, Удомля.
18. Антонович АВ., Черноусенко О.Ю., Елизаренко Т.Н., Бурдейный А.М. Концептуальные основы построения автоматизированной системы диагностики технологических режимов и оборудования энергоблоков АЭС Украины, Техническое и программно-математическое обеспечение // Энергетика и электрификация. 2005. №3. С. 18—24,56.
19. Черепанов О.А. Системы диагностирования на блоке 2 Хмельницкой АЭС // Семинар Московского центра Всемирной ассоциации организаций, эксплуатирующих атомные электростанции, «Вопросы диагностики оборудования АЭС. Практическое применение методов диагностики для перехода на обслуживание оборудования АЭС по техническому состоянию», 14-16 апреля 2009г.

## References

1. Use of noise diagnostics for WWER-440/ A. Grabner, G. Grunwald, P. Liewers e.a.: Report / Institute for Nuclear Research. Germany, Rosendorf, 1998.
2. Detection of core barrel motion at WWER-440 type reacto s (SMORN V) / P. Schumann, P. Liewers W Schmitt, F P Weiss // Prog Nucl Energy ,1988. Vol. 21. P. 89-93.
3. Schumann P. Zur abschatzung des Einflusses von relativen Regelekement bewegungen bei anomalen Rectorkorbbew Egungen // Kernenergie. 1990 Bd. 33. S. 223-227.
4. Arkadov G. V Pavelko V. I., Usanov A. I. Vibronoise diagnostics of PWR. / Ed. A. A. Abagyan. - M.: Energoatomizdat. 2004 - 344 p.
5. PC-based vibration momtonng in KOLA nuclear power plant system and com missioning results / R. Geilhausen, V. Reznik, S. Titov, H.-J. Wehling // Proc of 24th informal meeting on reactor noise. June 23-25, 1993, Oybin.
6. Kunze U., Bechold B. New generation of monitoring systems with on-line diagnostics // Prog. Nucl. Energy. 1995. Vol. 29. N 3-4. P. 215-227.
7. Modern methods of operational monitoring and nondestructive testing at nuclear power plants. Materials of the seminar Framatome ANP. November 22-23, 2002, Moscow.
8. Results of noise analysis in the WWER 440 type nuclear power plant Ducovany (SMORN-VII) / J. Runkel, D. Stegemann, J. Fiedler e.a. // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. June 19—23 1995, Avignon, France. P. 78-86.
9. Vibration measurements in PWR Obrigheim by use of m-core accelerome ters / E. Laggiard, J. Fiedler, J Runkel e.a. // Prog. Nucl. Energy. 1995 V. 29. P. 113-119.
10. Hrosso P., Maudry J., Korek J. Technical diagnostics of VI and V2 NPP at Bohunice (SMORN-VII) // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. June 19—23, 1995, Avignon, France. P. 561-571.
11. Hollo E., Siklossy P., Toth Z. Automated vibration monitoring system for WWER-440 nuclear power plant diagnostics and surveillance (SMORN-III) // Prog. Nucl. Energy. 1982. Vol. 9. P. 595-604.
12. Development and utilization of an automated reactor noise measuring and processing system / G. Por, S. Bende-Farkas, O. Glockler e.a. // A sym posium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI, May 19-24 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 - Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 18.01.
13. On-line diagnostic method for vibrational surveillance of PAKS NPP pn man' circuit equipment's / E.

Hollo, P. Siklossy, L. Turi, S. Ratkai. // A symposium on nuclear reactor surveillance and diagnostics. SMORN-VI May 19—24, 1991, Gatlinburg, Tennessee, USA. Session 4 - Modeling and monitoring the motion of PWR and BWR structures. Vol. 1. P. 20.01.

14. Czibok T., Kiss G. Regular neutron noise diagnostics measurements at the Hungarian Paks NPP (SMORN-VIII) // Prog. Nucl. Energy. 2003. Vol. 43 N 1-4, P. 67-74.
15. Por G. Monitoring and diagnosis systems to improve NPP realiability and safety monitoring and diagnosis systems to improve nuclear power plant reliability and safety // Proc. of the specialists' meeting IAEA May 14-17 1996, Gloucester, UK. P. 33—39.
16. Kozlosky T., Lowenfeld S., Bauman D. Advanced plant information systems using intelligent monitoring and diagnostics and the ALLY. // Plant Monitoring and Diagnostics System, SMIRT Conference (Post Conference Seminar), 1993, Konstanz, Germany.
17. Jakes M. Monitoring and diagnostic system of NPP Temelin operational monitoring of primary circuit components // Regional Workshop IAEA January 28-31, 2003, Udomlya.
18. Antonovich AB., Chernousenko O.Yu., Elizarenko T.N., Burdeiny A.M. Conceptual bases for building an automated system for diagnosing technological regimes and equipment of power units of Ukrainian NPPs, Technical and software-mathematical support // Energy and electrification. 2005. No. 3. pp. 18-24.56.
19. Cherepanov O.A. Diagnostic systems at unit 2 of the Khmelnytsky NPP // Seminar of the Moscow Center of the World Association of Organizations Operating Nuclear Power Plants, "Issues of diagnostics of NPP equipment. Practical application of diagnostic methods for the transition to maintenance of NPP equipment according to technical condition", April 14-16, 2009.

УДК. 621.039.68

# Анализ «малых» инцидентов энергетических установок с турбинами большой мощности и их влияние на эксплуатацию

Ю.В. Браславский, А.В. Сукрушев, А.Н. Фролова
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,г. Севастополь, 299053, Россия , ANFrolova@sevsu.ru*

Статья поступила 10.02.2022 г.; после доработки 14.02.2022 г.

***Аннотация***

*Проведен анализ возможных дефектов узлов турбин и признаков, по которым можно судить о возникновении этих дефектов. Показано, что виброшумовая диагностика позволяет выявить признаки появляющегося «малого» инцидента и его дальнейшее перерастания в аварию.*

*Ключевые слова:* дефекты узлов турбин, виброшумовая диагностика, безопасная эксплуатация энергетических установок

# Analysis of "small" incidents of power plants with high-power turbines and their impact on operation

Y.V. Braslavskiy, A.V. Sukrushev, A.N. Frolova
*Sevastopol State University, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia, , ANFrolova@sevsu.ru*

Received 10.02.2022 y.; received in final form 10.02.2022 y.

***Abstract***

*An analysis was made of possible defects in turbine units and signs by which one can judge the occurrence of these defects. It is shown that vibronoise diagnostics makes it possible to identify signs of an emerging "small" incident and its further development into an accident.*

*Keywords:* defects of turbine units, vibronoise diagnostics, safe operation of power plants.

## Введение

Современные концепции безопасной эксплуатации энергетических установок большой мощности (АЭС, ТЭС, транспортные турбоагрегаты) базируются на широком внедрении систем ранней диагностики. Комплекс таких систем, объединенных единой идеологией оперативного диагностирования, взаимодействующий с системами контроля и управления энергоустановки, призван обеспечить и полноту, и глубину диагностирования, отвечающие современным требованиям безопасной эксплуатации.

Одним из перспективных направлений является виброшумовая диагностика энергетического оборудования, которая по совокупному анализу сигналов различных датчиков вибраций и акустических шумов и флуктуирующих составляющих сигналов силовой установки позволяет определить безопасность ее эксплуатационного состояния.

Безопасность эксплуатации во многом определяется критериями нормальной эксплуатации, в основе которых лежит информация о виброшумовом состоянии объекта. Сегодня во всем мире фирмами-производителями оборудования для энергетических комплексов уделяется большое внимание проблемам вибрации как на стадии

проектирования и стендовой обработки элементов оборудования, так и в период пусконаладочных работ, а затем и в период нормальной эксплуатации. В настоящее время компьютерные системы вибрационного контроля являются атрибутом технического обслуживания современной теплоэнергетики [1-4].

## Постановка задачи

В настоящее время количество эксплуатируемых машин и оборудования в любой стране существенно превышает возможности их обслуживания и ремонта в соответствии с рекомендациями производителей. Выходом из сложившейся ситуации становится, во-первых, увеличение доли необслуживаемого оборудования, а, во-вторых, переход на ремонт машин и оборудования по фактическому состоянию. Но это возможно лишь при использовании методов и средств глубокой диагностики и долгосрочного прогноза состояния оборудования в процессе его эксплуатации, которые лишь в последние годы стали развиваться быстрыми темпами.

Информация о состоянии работающего оборудования с вращающимися узлами содержится, прежде всего, в сигнале вибрации. Поэтому анализ вибрации, а также температуры отдельных узлов, тока приводного двигателя и, в некоторых случаях, состава смазки стал основой нового направления технической диагностики, получившего название контроля состояния и диагностики машин. Именно это направление расширило возможности существующих методов неразрушающего контроля, позволило решать практические задачи долгосрочного прогноза состояния вращающегося оборудования и, как следствие, переходить на обслуживание и ремонт вращающегося оборудования по фактическому состоянию.

Надежность и ресурс энергетических установок АЭС, ТЭС, а так же транспортных установок в значительной степени определяются надежностью и ресурсом оборудования турбоагрегата. Вибрации наряду с коррозией, дефектами сварочных соединений и изменением механических свойств металла в процессе эксплуатации, являются фактором, определяющим их ресурс и надежность. Вибрации вызываются пульсациями давления транспортируемого потока, гидродинамическими и аэродинамическими явлениями в трубопроводах, вибрациями гидравлических машин и несущих конструкций и сейсмическими воздействиями. Вибрации являются основной причиной их повреждений и аварий.

В результате повышенной вибрации возникают трещины вследствие усталости материала, саморазвинчивание арматуры, путевых соединений и систем управления арматуры, разгерметизация трубопроводов, которая часто сопровождается взрывом и пожаром, а на АЭС – загрязнением окружающей среды.

В зависимости от типа оборудования в значительной мере отличается и набор контролируемых величин. Так, на быстроходных агрегатах на подшипниках скольжения помимо контроля абсолютной вибрации подшипниковых узлов в обязательном порядке должен производиться контроль относительной вибрации и осевого сдвига.

Стационарные системы, установленные на турбоагрегатах могут быть дополнительно укомплектованы датчиками линейных и угловых перемещений, а так же тепловых абсолютных и относительных расширений. На быстроходном оборудовании на подшипниках качения (вентиляторы, насосы и т.д.) наиболее информативным параметром является абсолютная вибрация подшипников.

Кроме этого, на агрегатах могут устанавливаться дополнительные датчики вибрации, например на корпус насоса, контролироваться температура подшипников, рабочие параметры электродвигателя, насоса и т.д.

При диагностике тихоходного оборудования высочайшие требования предъявляются к частотному диапазону датчиков, измеряющих абсолютную вибрацию подшипников.

На многорежимных агрегатах, где в значительной степени могут отличаться условия работы (частота вращения, нагрузка и т.д.) особую важность приобретает контроль зависимости вибрационных характеристик от режима работы оборудования.

Для эффективного разрешения этих противоречий для различных видов оборудования необходимо, прежде всего, проанализировать причины отказов; выявить те детали и узлы оборудования, которые лимитируют его надежность и выявить условия и режимы эксплуатации, влияющие на надежность.

## Основная часть

Анализ отказов необходимо проводить на основе информации, представляемой эксплуатирующей организацией — актов расследования отказов и других форм отчетности. Результаты

анализа во многом зависят от качества заполнения этих первичных документов. К сожалению, известно, что во многих организациях по ряду отказов акты не заполняются или в них указываются не все повреждения узлов. Не всегда сообщается информация о дефектах, которые выявляются во время планового ремонта оборудования. По этим и другим причинам официальная статистика отказов и причин, их вызвавших, получается неполной и иногда не вполне объективной [5].

Тем не менее, результаты статистического анализа информации, получаемой от оператора, дают достаточный объем информации для качественного анализа возможных дефектов узлов турбин и признаков, по которым можно судить о возникновении этих дефектов. Достоверность результатов такого анализа в значительной мере зависит от количества объектов, по которым собиралась информация.

Для выполнения анализа все отказы турбин, согласно принятой методике [6,7] подразделялись в соответствии с их причинами на следующие группы: повреждения проточной части, повреждения системы парораспределения, повреждения системы регулирования, повреждения подшипников, повреждения маслосистемы, повреждения трубопроводов и арматуры, повреждения прочих элементов. В [6-10] приведены данные причин отказов турбин и турбинного оборудования более чем по 800 паротурбинным установкам мощностью от 100 до 800 МВт разных типов и разных заводов-изготовителей, произошедших за 15 лет эксплуатации и вызвавших останов турбоагрегата.

Анализ повреждаемости узлов проводился раздельно для выборок по каждому типу турбин, представленных в табл. 1 (в таблице указан тип головного агрегата, а в графе "Количество" учтены также и все модификации). Необходимо отметить, что среди однотипных турбин, входящих в одну анализируемую группу, имелись турбины разных модификаций с различной наработкой; кроме того, они отличались друг от друга качеством ремонта и условиями эксплуатации (износ оборудования, количество пусков, качество используемой воды и другие). В связи с этим результаты анализа позволяют сделать только "качественную" оценку надежности узлов по характерным отказам. При проведении анализа была применена следующая методика [11]: для турбин каждого типа общее число отказов за исследуемый период принято за 100 % и затем, на основе этих данных, определена доля отказов, вызванных повреждениями элементов в соответствии с принятой выше классификацией.

***Таблица 1.*** *Типы и количество анализируемых установок*

| Турбоустановка с турбиной типа | Количество | Турбоустановка с турбиной типа | Количество |
|---|---|---|---|
| К-800-240 ЛМЗ | 19 | К-300-240 ХТЗ | 76 |
| К-500-240 ЛМЗ | 6 | К- 150- 130 ХТЗ | 84 |
| К-300-240 ЛМЗ | 89 | Т-250/300-240 ТМЗ | 29 |
| К- 100-90 ЛМЗ | 95 | Т-175-130 ТМЗ | 15 |
| Т- 180/210-130 ЛМЗ | 17 | Т- 100- 130 ТМЗ | 190 |
| К-500-240 ХТЗ | 10 | ПТ-135-130 ТМЗ | 31 |

Ниже представлены результаты анализа наиболее часто встречающихся повреждений отдельных узлов турбин: роторов, подшипников, рабочих лопаток, элементов маслосистем и так далее.

При анализе повреждений ротора отдельно рассматривались следующие детали: вал ротора, муфты, диски, уплотнения, рабочие лопатки. Распределение отказов этих элементов представлено на рис. 1.

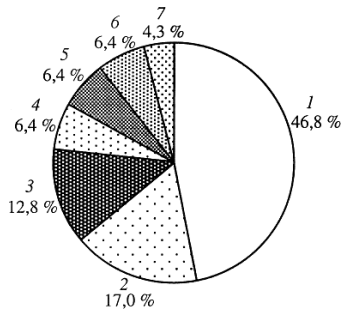



**Рис. 1.** Повреждаемые детали ротора: 1 — рабочие лопатки; 2 — вал ротора; 3 — муфта; 4 — концевые уплотнения; 5 — диафрагменные и надбандажные уплотнения; 6 — бандаж; 7 — диск

Наибольшее число повреждений приходится на долю рабочих лопаток (46,8 %). Повреждаемость вала ротора составляет 17 %; при этом 75 % повреждений вала ротора — это прогиб вала, который обычно сопровождается задеваниями в проточной части и повреждением гребней концевых уплотнений. Наиболее частыми причинами прогиба ротора в анализируемых отказах были задевания ротора о неподвижные части вследствие коробления цилиндра при попадании влаги, значительных расцентровок,

малых зазоров в уплотнениях, повышенного уровня вибрации; в 30 % случаев причина прогиба вала — заброс воды в проточную часть. Кроме того, характерным повреждением для роторов является образование трещин вала со стороны осевого канала, что, как правило, определяется усталостью металла.

Большинство повреждений рабочих лопаток (до 65 %), распределение которых представлено на рис. 2, а, связано с обрывом пера рабочей лопатки в прикорневой зоне и в сечении отверстий под демпферную проволоку. В ряде случаев обнаружены трещины в лопатке (≈12% общего числа повреждений рабочих лопаток) и повышенный эрозионный износ рабочих лопаток (≈ 8 % повреждений рабочих лопаток). Обрыв рабочих лопаток практически всегда сопровождаются заметными изменениями в состоянии турбины (рис. 2, б). В большинстве случаев (62 %) происходит изменение вибрационного состояния турбины.

Кроме того, в 14 % случаев повреждения рабочих лопаток сопровождаются шумом в проточной части. Еще одним распространенным признаком (до 10 % случаев) обрыва в основном лопаток части низкого давления является увеличение жесткости конденсата. В 14 % случаев останова турбин с поврежденными рабочими лопатками наблюдается сокращение времени выбега ротора (как правило, из-за высокого уровня вибрации). Во многих случаях эти признаки наблюдаются одновременно в различных комбинациях. Большинство дефектов рабочих лопаток (рис. 2, в) связано с исчерпанием запасов прочности и усталостью металла (50 % повреждений).

Второй основной причиной дефектов является эрозионный износ входных и выходных кромок (25 % повреждений). Анализ причин и характера повреждаемости подшипников проводился отдельно для опорных, упорных и упорно-опорных подшипников, уплотняющих подшипников генератора. При этом повреждения опорных подшипников составляют 42 % от общего числа повреждений подшипников, а повреждения упорных (упорно-опорных) — 45 %.

Дефекты опорных подшипников (рис. 3 а) сводятся в основном к различным повреждениям баббита вкладышей. Наиболее часто происходят выкрашивание баббита (≈16 % всех повреждений); подплавление его ((≈16 %); натяг (12,5 %); отслоение, скол, растрескивание (12,5 %).

Дефекты опорных подшипников сопровождаются заметными изменениями в состоянии турбоагрегата (рис. 3, б).

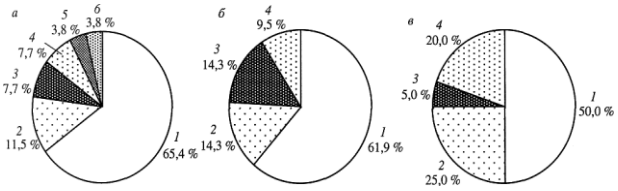



**Рис. 2.** Повреждения рабочих лопаток: а — распределение повреждений рабочих лопаток (1 — обрыв рабочих лопаток; 2 — трещины в лопатках; 3 — эрозийный износ лопаток; 4 — повреждения бандажа; 5 — подрезка шипов рабочих лопаток; 6 — разрушение демпферной проволоки); б— признаки наблюдаемые при повреждениях рабочих лопаток (/ — нарушение нормального вибросостояния; 2 — шум в проточной части; 3 — сокращение времени выбега ротора; 4 — увеличение жесткости конденсата вследствие повреждения трубок конденсатора оторвавшимися рабочими лопатками или их частями); в — распределение причин повреждений рабочих лопаток (1 — исчерпание запасов прочности и усталость металла; 2 — эрозионный износ; 3 — коррозионный износ; 4 — прочее)

Наиболее характерными признаками являются: изменение вибросостояния подшипников (при 50 % повреждений); повышение температуры баббита (≈ 22 %), течь масла (13 %). Одними из основных причин повреждений опорных подшипников, распределение которых представлено на рис. 3, в, являются проблемы с маслом — ухудшение маслоснабжения (≈ 30 % всех причин) и низкое качество масла из-за его обводнения (≈ 6 %). Ухудшение маслоснабжения происходило как из-за малой (меньше формулярной) величины зазоров в подшипнике, так и из-за дефектов маслосистемы (прекращение подачи масла или временный срыв масляного клина из-за повреждения масляных насосов и их позднего включения, снижение давления масла, перекрытие напорных маслопроводов посторонним предметом).

В ряде случаев наблюдались значительные протечки масла из корпуса подшипника, их причиной были увеличенные зазоры по масляным уплотнениям подшипника, перекрытие посторонними предметами сливных маслопроводов и засорение дренажных отверстий.

При повреждениях упорных и опорно-упорных подшипников происходит в основном подплавление или выплавление баббита колодок (39 % повреждений), а также их механическое повреждение и износ (49 %). В большинстве случаев (64 %) повреждения упорных подшипников вызывают увеличение осевого сдвига ротора ча-

сто до срабатывания защиты (рис. 4, а). Характерными признаками повреждений упорных подшипников являются также повышение температуры баббита упорных колодок (18 %) и увеличение уровня вибрации (12 %). В ряде случаев при повреждениях упорных подшипников все эти признаки наблюдаются одновременно. Причины повреждений упорных колодок представлены на рис. 4, б. Основная причина — увеличение величины осевого усилия (≈ 62 % повреждений). Причиной 13 % повреждений признается низкое качество масла из-за его обводнения. Третья по частоте проявления группа причин (10 %) связана с дефектами ремонта (высокие или малые натяги на сферу, неправильная подгонка вкладышей, неравномерное усилие на колодки).

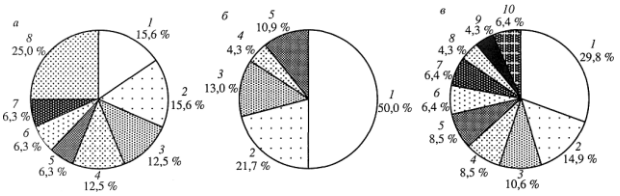



**Рис. 3.** Повреждения опорных подшипников:
а — распределение повреждений опорных подшипников (1 — подплавление баббита; 2 — выкрашивание баббита; 3 — отслоение баббита; 4 — натяг баббита; 5 — натиры на баббите; 6 — местные выработки в баббите; 7 — следы попадания посторонних предметов; 8 — прочее);
б — признаки, наблюдаемые при повреждении опорных подшипников (1 — изменение вибросостояния; 2 — повышение температуры баббита вкладышей; 3 — течь масла; 4 — дым из подшипника; 5 — прочее);
в — распределение причин повреждений опорных подшипников (1 — ухудшение маслоснабжения; 2 — расцентровка опор и роторов; 3 — нарушение нормального вибросостояния; 4 — некачественная заливка и повреждения баббита; 5 — стесненное перемещение подшипника; 6 — низкое качество масла; 7 — попадание инородного предмета; 8 — качество сборки и работы муфт; 9 — отклонение величины натяга; 10 — прочее)

Уплотняющие подшипники генератора повреждаются в 13 % случаев от общего числа повреждений подшипников. Наиболее распространенный дефект уплотняющих подшипников — нарушение герметичности уплотнений, происходящее вследствие кратковременного заедания уплотняющего кольца водородных уплотнений, снижения давления масла на регулятор прижима, износа прижимных пружин, дефектов сборки масляных уплотнений.

Такие повреждения сопровождаются течами масла из уплотнения, повышенным сливом масла с подшипников, утечками водорода. В отдельных случаях у уплотняющих подшипников наблюдались выплавление баббита и натиры на упорном гребне.

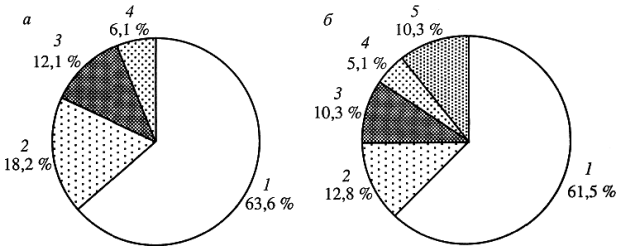



**Рис. 4.** Повреждения упорных (опорно-упорных) подшипников:
а — признаки, наблюдаемые при повреждении упорных подшипников (1 — увеличение осевого сдвига; 2 — повышение температуры баббита вкладышей; 3 — течь масла; 4 — нарушение нормального вибросостояния);
б — распределение причин повреждений упорных подшипников (1 — увеличение осевого усилия; 2 — низкое качество масла; 3 — дефекты ремонта; 4 — стесненное перемещение подшипника; 5 — прочее)

На рис. 5 представлено распределение причин, вызывающих увеличение осевых усилий.

Как показывает анализ, практически все повреждения подшипников и деталей роторов приводят к неплановому останову турбины.

Только 12,5 % повреждений вала ротора и 28 % повреждений рабочих лопаток были обнаружены во время плановых ремонтов. Эти дефекты не вызывали заметного изменения в состоянии турбины. Среди них: трещины в осевом канале вала ротора, эрозионный износ рабочих лопаток, трещины в пере рабочей лопатки и отрыв части пера.

В ряде случаев были обнаружены одновременные повреждения подшипников и деталей ротора. Например, вследствие заброса воды в проточную часть произошел прогиб ротора высокого давления и повреждение подшипников этого ротора. Как показано выше, значительное количество повреждений подшипников происходит из-за низкого качества масла и дефектов в системе маслоснабжения турбины.

При анализе повреждаемости маслосистемы основное внимание уделялось тем повреждениям, которые влияют на надежность работы турбины и могут привести к появлению дефектов и остановам турбины.

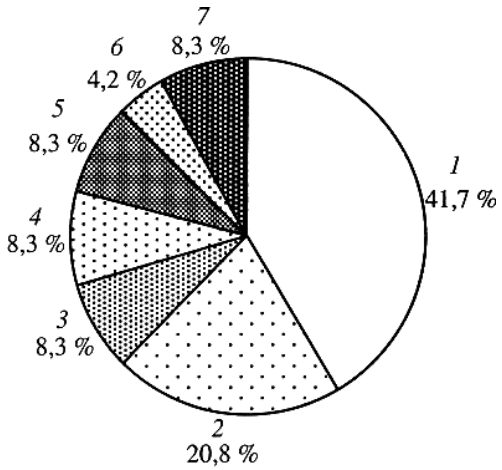



**Рис. 5.** Распределение причин увеличения осевых усилий:
1 — наброс нагрузки; 2 — солевой занос; 3 — защемление муфты; 4 — плохой ремонт; 5 — заброс воды в проточную часть; 6 — падение вакуума; 7 — прочее

Наиболее повреждаемым элементом маслосистемы (рис. 6) являются маслопроводы (43 % повреждений); для них характерны трещины, свищи, расхождения фланцев, истирания, механические повреждения и износ трубопроводов, дефекты прокладок. Вторым элементом по частоте повреждаемости (26 %) является главный масляный насос (повреждение вала маслонасоса, чаще всего излом на переходе фланец-вал и рабочего колеса). До 12 % повреждений маслосистемы приходится на долю маслоохладителей (неплотности трубных систем, разрывы и свищи в трубках, повреждения трубных досок).

Анализ причин дефектов маслосистемы показал, что до 30 % дефектов происходит из-за недостатков изготовления, монтажа и ремонта элементов маслосистем. Так, например, повреждения вала главного масляного насоса происходили вследствие утонения стенок фланцевого соединения, несоосности соединений вала турбины и маслонасоса, нарушения режима термообработки детали при изготовлении. Вторая распространенная причина (до 20 %) — исчерпание ресурса прочности материала. До 7,8 % дефектов связано с коррозионным износом.

Повреждения и отказы в работе системы маслоснабжения наиболее часто проявляются в течях масла (34,7 %), уменьшении давления масла (20,8 %), увеличении температуры и снижении уровня масла.

Значительное количество отказов происходит в системах автоматического регулирования и пораспределения. Большинство из них приводит к неустойчивой работе системы автоматического регулирования (САР) (до 11 % отказов САР), самопроизвольному закрытию стопорных и регулирующих клапанов (до 43 % отказов САР), самопроизвольному сбросу нагрузки (15—20 % отказов САР).

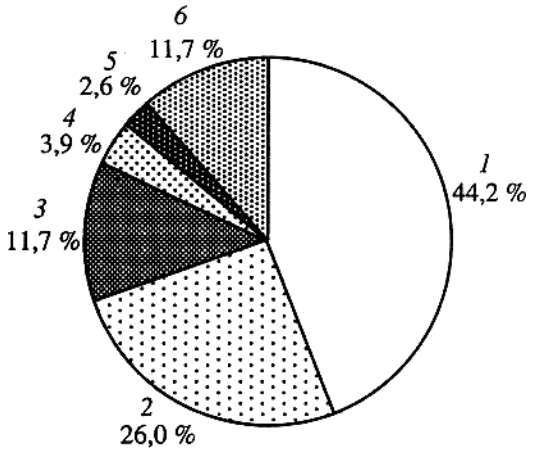



**Рис. 6.** Повреждаемость элементов маслосистемы:
1 — маслопроводы и арматура; 2 — главный маслонасос; 3 — маслоохладитель; 4 — маслобак; 5 — инжектор; 6 — прочее

Один из наиболее повреждаемых элементов систем регулирования — регулятор скорости; 35,7 % его повреждений происходят вследствие излома ленты или пружины регулятора скорости, более 7 % из-за попадания посторонних предметов, и более 7 % из-за износа золотников.

Повреждения регулятора скорости происходят в основном из-за заноса шламом, примесями, бакелитом зазора золотник-букса, импульсных линий и другого, а также из-за дефектов изготовления и ремонта.

Отказы, вызванные повреждениями золотников и сервомоторов высокого давления и промперегрева, происходят обычно из-за попадания посторонних предметов (грат, кусочки бакелита) в окна подачи масла на золотники и буксы (до 50 % повреждений), а также из-за износа деталей (золотников, штоков) при длительной эксплуатации (20 %).

До 15 % отказов систем регулирования вызваны повреждениями трубопроводов, происходящих вследствие наличия коррозии и раковин в металле; усталости металла из-за вибрационных нагрузок при неправильной трассировке трубопроводов; возникновения трещин; плохой сборки фланцев.

Достаточно часто встречаются повреждения регулирующих клапанов: обрывы штоков регу-

лирующих клапанов, заклинивания регулирующего клапана, срыв резьбы на штоке и гайке регулирующего клапана, выпрессовка седла регулирующего клапана, самопроизвольное отворачивание стакана регулирующего клапана по резьбе и другие, происходящие из-за усталостного износа, дефектов изготовления, нарушений технологии при сборке, недостатков конструкции.

На рис. 7 представлены усредненные по всем типам анализируемого оборудования данные по распределению отказов турбин по причинам. Наибольшее число отказов приходится на повреждения систем регулирования и повреждения подшипников.

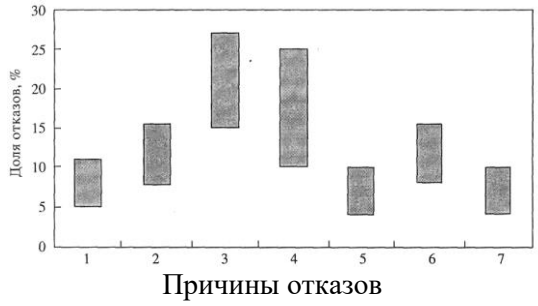



**Рис. 7.** Распределение отказов турбин по причинам: 1 — повреждения проточной части; 2 — повреждения системы парораспределения; 3 — повреждения системы регулирования; 4 — повреждения подшипников; 5 — повреждения маслосистемы; 6 — повреждения трубопроводов и арматуры; 7 — повышенная вибрация

## Заключение

1. Результаты анализа показали, что доля отказов и доля времени восстановления из-за повреждений элементов каждой группы практически для всех типов турбин, представленных в табл. 1, имеют близкие значения.

2. Для отдельных типов турбин возможны отклонения от общей картины. Например, для турбин типа Т-175-130 и ПТ-135-130 ТМЗ наиболее характерны повреждения элементов проточной части — более 40 % общего числа отказов (трещины в дисках, поломка лопаток, повреждения бандажных связей), а для турбины типа Т-100-130 ТМЗ — повреждения системы парораспределения — 20,6 % отказов (обрыв штоков клапанов, их изгиб, трещины в корпусах клапанов, повреждения сопловых коробок клапанов, дефекты кулачкового распределительного устройства).

3. Вместе с тем, анализ показывает, что для ряда турбин до 30 % неплановых остановов вызваны неудовлетворительным вибросостоянием (низкочастотная вибрация, задевания в проточной части, разбалансировка, расцентровка, тепловой прогиб роторов и тому подобное).

4. Также, результаты анализа повреждаемости, представленные выше, показали, что ряд признаков характерны для повреждений большинства рассмотренных элементов. Кроме того, ряд процессов, являющихся признаками одного из повреждений, могут быть причинами других повреждений, например, изменение величины осевого сдвига ротора или увеличение уровня вибрации, которые в большинстве случаев, приводят к отказу турбины и, как следствие, к неплановому останову.

Это дает основания связать большинство появляющихся дефектов с характерными для них вибрациями и шумами, которые могут быть положены в основу диагностирующего признака появляющегося «малого» инцидента и его дальнейшего перерастания в исходное событие аварии.

5. Таким образом, непрерывный контроль вибрационных и механических величин должен обеспечивается на всех эксплуатационных режимах турбоагрегата. Контроль виброшумовой информации от основных узлов турбинной установки позволит решать комплексные задачи диагностирования состояния энергоустановки в целом.

Данные о вибрации подшипников (системы контроля и защиты по виброскорости, орбиты, амплитуды/фазы 1, 2, 3-й гармоник, спектры, тренды, скоростные характеристики и т.д.) позволят определять уровень и характер неуравновешенности агрегата, качество соединения роторов, нагрузочные факторы, влияющие на изменение вибрации, контролировать изменение уровня вибрации во времени, на пусках-остановах и на аварийных режимах.

Информация о вибрации валов по ее длине позволит более эффективно определять величину и место неуравновешенности валопровода, в том числе, при отрыве лопаток, корректировать расцентровки по статическому положению роторов на масляном слое, оценивать качество сборки роторов. Сопоставление виброшумовой информации с измерениями механических величин (осевой, сдвиг, относительное расширение роторов, абсолютное расширение цилиндров, наклоны опор, искривление роторов и т.д.) позволят контролировать тепломеханическое состояние агрегата в режимах пуска, набора мощности, работы под нагрузкой, процессы останова и

остывания.

## Список литературы


1. Розенберг Г.Ш. и др. Вибродиагностика. СПб.: ПЭИПК, 2003. 284 С.
2. Рунов Б.Т., Меерович Л.Б. Развитие вибродиагностики паровых турбоагрегатов ТЭС и АЭС. Вибрация паровых турбоагрегатов. - М.: Энергоиздат, 1981, с. 93-103. - Библиогр.: 7 назв.
3. Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций. Сборник докладов. Москва. ОАО "ВТИ". 2013.- 326 с.
4. Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР. Материалы 8-й международной научно-технической конференции, 28-31 мая 2013г. ОКБ "Гидропресс".
5. Жученко Л.А., Кортенко В.В., Данда В.И. Организация сбора и обработки информации по повреждаемости элементов проточной части // Совершенствование теплотехнического оборудования ТЭС, внедрение систем сервисного обслуживания, диагностирования и ремонта / Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2002. С 189—195.
6. Анализ работы энергетических блоков мощностью 150—1200 МВт за 1986—95 годы / СПО ОРГРЭС. М.: 1996г.
7. Обзоры повреждений тепломеханического оборудования электростанций с поперечными связями и тепловых сетей за 1986—95 годы / СПО ОРГРЭС. М., 1996г.
8. Анализ показателей надежности теплообменных аппаратов ТЭС / Бродов Ю.М., Резникова Р.С., Краснова Г.И., Чайка А.И. // Энергомашиностроение. 1982. № И. С. 35—39.
9. Бродов Ю.М., Мурманский Б.Е., Мительман М.М. и др. Анализ показателей надежности турбоустановок и энергоблоков в целом АО "Свердловэнерго" // Теплоэнергетика. 1997. № 1. С. 9—14.
10. Показатели надежности основного и вспомогательного оборудования турбоустановок ТЭС Свердловэнерго / Бродов Ю.М., Мурманский Б.Е., Мительман М.М. и др. // Электрические станции. 1997. № 5. С. 12—15.
11. Ремонт паровых турбин. Родин В.Н., Шарапов А.Г. и др. 2002 г. ГОУ Уральский государственный технический университет — УПИ, 230 с.


## References


1. Rosenberg G.Sh. etc. Vibrodiagnostics. St. Petersburg: PEIPC, 2003. 284 p.
2. Runov B.T., Meerovich L.B. Development of vibration diagnostics of steam turbine units of TPPs and NPPs. Vibration of steam turbine units. - M.: Energoizdat, 1981, p. 93-103. - Bibliography: 7 titles.
3. Problems of vibration, vibration adjustment, vibration monitoring and diagnostics of power plant equipment. Collection of reports. Moscow. JSC "VTI" 2013.- 326 p.
4. Ensuring the safety of nuclear power plants with PWR. Materials of the 8th international scientific and technical conference, May 28-31, 2013. OKB "Gidropress".
5. Zhuchenko L.A., Kortenko V.V., Danda V.I. Organization of the collection and processing of information on the damageability of the elements of the flow path // Improvement of the thermal equipment of thermal power plants, the introduction of service maintenance, diagnostics and repair systems / Ekaterinburg: USTU-UPI, 2002. P 189-195.
6. Analysis of the work of power units with a capacity of 150-1200 MW for 1986-95 / SPO ORGRES. M.: 1996
7. Reviews of damage to thermal mechanical equipment of power plants with cross connections and heating networks for 1986-95 / SPO ORGRES. M., 1996
8. Analysis of reliability indicators of heat exchangers at TPPs / Brodov Yu.M., Reznikova RS, Krasnova G.I., Chaika A.I. // Power engineering. 1982. No. I. S. 35-39.
9. Brodov Yu.M., Murmansky B.E., Mitelman M.M. et al. Analysis of indicators of reliability of turbine installations and power units in general JSC "Sverdlovenergo" // Teploenergetika. 1997. No. 1. S. 9-14.
10. Reliability indicators of the main and auxiliary equipment of turbine units of Sverdlovenergo TPP / Brodov Yu.M., Murmansky B.E., Mitelman M.M. etc. // Electric stations. 1997. No. 5. S. 12-15.
11. Repair of steam turbines. Rodin V.N., Sharapov A.G. and others. 2002 Ural State Technical University - UPI, 230 p

УДК 621.039.56

# Локализация повреждений статора турбогенератора на основе акустических характеристик

С.А. Качур, Н.В. Шахова
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru*

Статья поступила 21.01.2022 г.; после доработки 24.01.2022 г.

***Аннотация***

*Предложена модель изменения тепловыделения в обмотках статора турбогенератора, позволяющая совместно с методом акустического анализа повысить скорость локализации повреждений турбогенератора и предотвращения аварийных ситуаций на атомных и тепловых электростанциях.*

*Ключевые слова:* турбогенератор, акустические характеристики, локализация повреждений, статор.

# Localization of damage to the turbine generator stator based on acoustic characteristics

S.A. Kachur, N.V. Shakhova
*Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru*

Received 21.01.2022 y.; received in final form 24.01.2022 y.

***Abstract***

*A model of heat release changes in the stator windings of a turbogenerator is proposed, which, together with the method of acoustic analysis, increases the rate of localization of damage to the turbogenerator and prevents accidents at nuclear and thermal power plants.*

*Keywords*: nuclear turbine generator, acoustic characteristics, localization of damage, stator.

## Введение

Высокая надежность работы оборудования ЯЭУ, в том числе турбогенераторов, является одним из главных факторов, обеспечивающих бесперебойное электроснабжение промышленности. Изменение технического состояния объектов в процессе эксплуатации обусловлено воздействием различных эксплуатационных факторов, которые в свою очередь обусловливают протекание физико-химических процессов в элементах конструкции ЯЭУ и ее функциональных системах [1].

Анализ повреждений статора турбогенератора позволяет сделать следующее заключение: наиболее опасным и неконтролируемым повреждением является повреждение в головках стержней с последующим разрушением изоляции и повреждением активной стали [2]. Для данного типа повреждений характерно значительное повышение температуры обмотки, и, следовательно, появление температурных шумов. В настоящее время отсутствуют системы контроля и методы идентификации нарушения контакта под нагрузкой, что приводит к пожару в лобовых частях, после которого требуется частичная или полная замена обмоток статора турбогенератора.

Исследования тепловыделения, теплоотдачи, теплообмена рассмотрены в целом ряде монографий и статей [3-5]. Возникает задача модифицирования существующих моделей теплообмена с учетом особенностей повреждений статора турбогенератора и необходимости локализа-

ции таких повреждений на ранней стадии в процессе эксплуатации за счет применения акустических методов.

## Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – разработка метода локализации изменения тепловыделения обмоток статора турбогенератора на основе характеристик, полученных акустическими методами в процессе эксплуатация, для повышения скорости локализации повреждений турбогенератора и предотвращения аварийных ситуаций на атомных и тепловых электростанциях.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) выбор моделей и определение набора экспериментальных характеристик как основы построения модели тепловыделения турбогенератора;
2) построение модели изменения тепловыделения статора в результате модификации существующих моделей описания течения двухфазного потока в каналах с подводом тепла;
3) создание метода локализации повреждений статора на основе предложенной модели;
4) исследование адекватности предложенной модели экспериментальным данным.

## Локализация изменения тепловыделения в обмотках статора

Предлагается за основу построения модели тепловыделения статора принять существующие модели, описывающие течение в канале двухфазного потока жидкости с подводом тепла, поскольку для охлаждения обмотки статора турбогенератора по полым проводникам проходит дистиллированная вода.

Характер зависимостей истинного паросодержания в обогреваемых каналах, т.е. для диабатного течения, различен для четырех областей расходного паросодержания (рис. 1) [4].

Принятые на рис.1 обозначения параметров: Тж – температура жидкости (°С); Ts – температура кипения при данном давлении (°С); θст – температура стенки канала (°С); φ – истинное паросодержание (относительное проходное сечение паровой фазы); x – массовое паросодержание (относительная энтальпия); q – удельный тепловой поток (МВт/м2); l – длина канала (м).

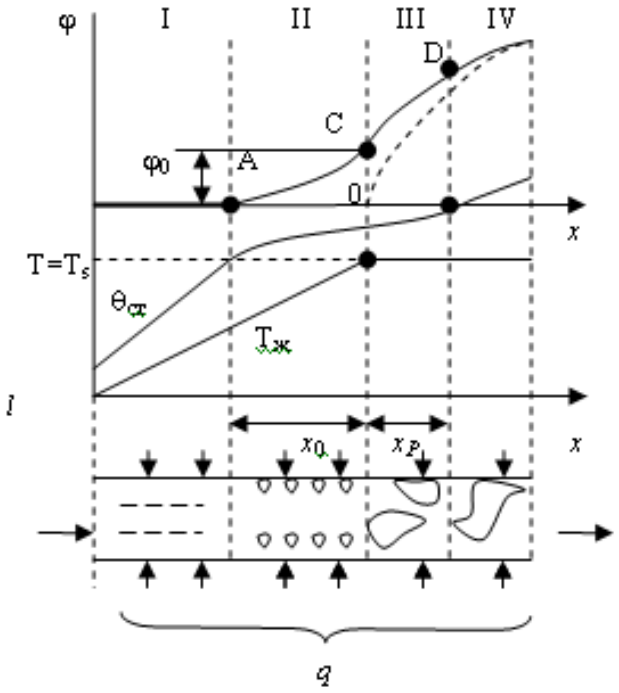



**Рис. 1.** Характер зависимостей φ, $T_ж$, $θ_{ст}$ от *x* при течении пароводяной смеси в канале с подводом тепла.

На начальном участке (область I) течение имеет конвективный характер, свойственный для прохождения охладителя (дистиллята) в стержнях обмотки статора турбогенератора. Область II представляет собой режим поверхностного кипения, характеризующийся следующими термодинамическими условиями: Тж< Ts, θст≥Ts. На этом участке паровые пузырьки образуются на поверхности нагрева, проникают в поток и конденсируются в его ядре. Истинное объемное паросодержание (кривая АС) лежит в области отрицательных значений x. Дальнейшее движение теплоносителя по его течению приводит к объемному кипению, которое имеет место при термодинамических условиях Тж=Ts, θст>Ts (область III). Четвертая область кипения (область IV) представляет собой кризисный участок кипения, на котором установлены термодинамические условия Тж= Ts, θст>>Ts. Данная область и соответствующий ей режим является недопустимым для нормальной эксплуатации турбогенератора.

В работе [5] рассмотрено более подробно экспериментальное исследование конвективного характера течения и поверхностного кипения жидкости в исследовательском канале. Экспериментальные данные как результат исследований

акустических измерений сводились к характеристикам, представленным на рис.2.

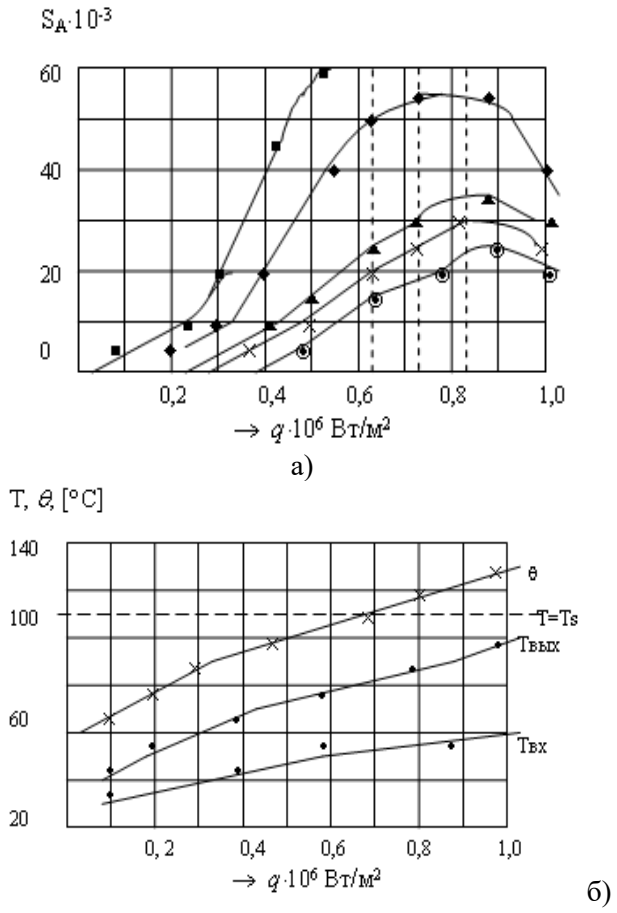



**Рис. 2.** Экспериментальные данные, характеризующие температурный режим канала (б) и акустические спектральные характеристики (а) при частотах
■ – $f$=0…1 кГц; ◆ – $f$=1…2 кГц; ▲ – $f$=2…3 кГц;
× – $f$=3…4 кГц;
⦿ – $f$=4…5 кГц.

В результате анализ этих характеристик была разработана модель тенденции запаривания канала активной зоны реактора [6]. Выводы, положенные в основу этой модели, могут быть использованы и при построении математической модели температурного режима в стержнях обмотки статора турбогенератора.

Из графиков рис.2 видно, что до начала поверхностного кипения все характеристики имеют один наклон

$$\frac{\Delta q}{\Delta A \cdot f} \cdot k_H = \frac{\Delta q}{\Delta T}\ , \qquad (1)$$

где $\Delta A$ – относительное изменение $S_A$ спектральной плотности флуктуации акустического шума при изменении удельной плотности теплового потока $\Delta q$; $\Delta T$ – изменение температуры теплоносителя (охладителя) на выходе канала при изменении $\Delta q$; $f$ – частота шума; $k_H$ – коэффициент согласования размерности.

Для характеристики рис.2(б) определим изменение удельной плотности теплового потока теплоносителя при постоянном расходе теплоносителя следующим образом

$$\Delta q_T = CG \cdot \Delta T\ , \qquad (2)$$

где $q_T$ – удельная плотность теплового потока теплоносителя; $T$ – температура теплоносителя на выходе стержня обмотки статора; $G$ – массовый расход теплоносителя; $C$ – удельная теплоемкость.

Проведя преобразование (2), получим

$$\frac{\Delta q_T}{\Delta T} = CG \cdot \qquad (3)$$

Используя закон Джоуля–Ленца для определения изменения удельной плотности теплового потока при прохождении электрического тока через проводник обмотки статора турбогенератора, получим соотношение

$$\Delta q_П = I^2 r \Delta t\ , \qquad (4)$$

где $q_П$ – удельная плотность теплового потока проводника обмотки статора; $I$ –ток, протекающий через обмотку статора; $r$ –удельное сопротивление проводника; $\Delta t$ – время изменения сопротивления проводника.

Таким образом, изменение тепловыделения в обмотках статора турбогенератора на основе акустических характеристик описывается соотношением

$$\frac{\Delta q_П}{\Delta A \cdot f} \cdot k_H = \frac{\Delta q_T}{\Delta T}\ , \qquad (5)$$

Учитывая выражения (3-5), опишем изменение температурного режима в стержнях статора, вызванного повреждениями обмоток статора, за время $\Delta t$ в виде соотношения

$$\frac{I^2 r \Delta t}{\Delta A \cdot f} \cdot k_H = CG \cdot \qquad (6)$$

Предложенная модель позволяет прогнозировать изменение сопротивления (уменьшение) на основе акустических характеристик следующим образом

$$r = \frac{fCGI^2}{k_H} \cdot \frac{\Delta A}{\Delta t} \cdot \qquad (7)$$

Повреждение обмоток статора приводит к изменению сопротивления в локальной области. Подобные повреждения существующими методами на начальной стадии в процессе эксплуатации не выявляются. Координаты центра такой области определяются методом акустического анализа повреждений обмоток статора турбогенератора. Скорость локализации повреждений менее

2с, что на порядок превышает быстродействие существующих систем теплового контроля турбогенератора.

| q | Твх | Твых | θ |
|---|---|---|---|
| 0.1 | 20 | 32 | 58 |
| 0.2 | 25 | 43 | 67 |
| 0.3 | 30 | 50 | 80 |
| 0.4 | 32 | 59 | 85 |
| 0.6 | 40 | 69 | 95 |
| 0.8 | 45 | 79 | 110 |
| 1.0 | 50 | 90 | 120 |

**Regression Analysis**
The regression equation is
Твх = 18.7 + 32.8 q

| Predictor | Coef | StDev | T | P |
|---|---|---|---|---|
| Constant | 18.652 | 1.056 | 17.66 | 0.000 |
| q | 32.775 | 1.842 | 17.79 | 0.000 |

S = 1.484 R-Sq = 98.4% R-Sq(adj) = 98.1%
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Regression | 1 | 696.71 | 696.71 | 316.56 | 0.000 |
| Error | 5 | 11.00 | 2.20 | | |
| Total | 6 | 707.71 | | | |

**Regression Analysis**
The regression equation is
Твых = 30.3 + 61.7 q

| Predictor | Coef | StDev | T | P |
|---|---|---|---|---|
| Constant | 30.308 | 2.134 | 14.20 | 0.000 |
| q | 61.718 | 3.723 | 16.58 | 0.000 |

S = 2.998 R-Sq = 98.2% R-Sq(adj) = 97.9%
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Regression | 1 | 2470.5 | 2470.5 | 274.85 | 0.000 |
| Error | 5 | 44.9 | 9.0 | | |
| Total | 6 | 2515.4 | | | |

**Regression Analysis**
The regression equation is
θ = 55.3 + 67.0 q

| Predictor | Coef | StDev | T | P |
|---|---|---|---|---|
| Constant | 55.291 | 2.365 | 23.38 | 0.000 |
| q | 67.048 | 4.126 | 16.25 | 0.000 |

S = 3.323 R-Sq = 98.1% R-Sq(adj) = 97.8%
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Regression | 1 | 2915.7 | 2915.7 | 264.07 | 0.000 |
| Error | 5 | 55.2 | 11.0 | | |
| Total | 6 | 2970.9 | | | |

**Рис. 3.** Регрессионный анализ зависимости температуры на входе, выходе канала и температуры стенки канала от удельной плотности теплового потока

| q | S5 | S4 | S3 |
|---|---|---|---|
| 0.4 | 2 | 7 | 10 |
| 0.5 | 7 | 12 | 15 |
| 0.6 | 12 | 18 | 23 |
| 0.7 | 18 | 25 | 30 |

**Regression Analysis**
The regression equation is
S5 = - 19.4 + 53.0 q

| Predictor | Coef | StDev | T | P |
|---|---|---|---|---|
| Constant | -19.4000 | 0.9721 | -19.96 | 0.003 |
| q | 53.000 | 1.732 | 30.60 | 0.001 |

S = 0.3873 R-Sq = 99.8% R-Sq(adj) = 99.7%
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Regression | 1 | 140.45 | 140.45 | 936.33 | 0.001 |
| Error | 2 | 0.30 | 0.15 | | |
| Total | 3 | 140.75 | | | |

**Regression Analysis**
The regression equation is
S4 = - 17.5 + 60.0 q

| Predictor | Coef | StDev | T | P |
|---|---|---|---|---|
| Constant | -17.500 | 1.775 | -9.86 | 0.010 |
| q | 60.000 | 3.162 | 18.97 | 0.003 |

S = 0.7071 R-Sq = 99.4% R-Sq(adj) = 99.2%
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Regression | 1 | 180.00 | 180.00 | 360.00 | 0.003 |
| Error | 2 | 1.00 | 0.50 | | |
| Total | 3 | 181.00 | | | |

**Regression Analysis**
The regression equation is
S5 = - 17.9 + 68.0 q

| Predictor | Coef | StDev | T | P |
|---|---|---|---|---|
| Constant | -17.900 | 2.381 | -7.52 | 0.017 |
| q | 68.000 | 4.243 | 16.03 | 0.004 |

S = 0.9487 R-Sq = 99.2% R-Sq(adj) = 98.8%
Analysis of Variance

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|---|---|---|---|---|---|
| Regression | 1 | 231.20 | 231.20 | 256.89 | 0.004 |
| Error | 2 | 1.80 | 0.90 | | |
| Total | 3 | 233.00 | | | |

**Рис. 4.** Регрессионный анализ зависимости спектральных характеристик S3-S5 (f=3..5 кГц) от удельной плотности теплового потока

### Исследование адекватности модели тепловыделения статора

Быстродействие прогноза и локализации повреждение связана с простотой модели, которая основана на линеаризации эмпирических зависимостей, представленные на рис.2. Проверка статистической значимости гипотезы о линейности характеристик теплового режима выполнена в прикладном пакете Minitab. Результаты исследования представлены на рис.3, 4.

Проведенный регрессионный анализ показал, что коэффициент детерминации для линейных моделей, построенных по экспериментальным данным рисунка 2, не менее 0,98. Таким образом, можно говорить, что погрешность разработанной модели не превышает 2%.

### Выводы

Разработанная модель изменения тепловыделения обмоток статора является модификацией модели тенденции запаривания канала активной зоны реактора, учитывающей особенности функционирования объекта исследования – турбогенератора.

Созданный метод на основе предложенной модели и характеристик, полученных акустическими методами в процессе эксплуатация, позволяет повысить скорость локализации повреждений турбогенератора и предотвращения аварийных ситуаций на атомных и тепловых электростанциях. Быстродействие при идентификации повреждений менее 2с, что на порядок превышает быстродействие существующих систем теплового контроля турбогенератора.

Метод и модель могут быть использованы в системах теплового контроля турбогенератора на атомных и тепловых электростанциях.

### Список литературы


1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций./ В.А. Острейковский – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
2. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов/ Б.А. Алексеев – М.: Из-во НЦ ЭМАС, 2001. –152с.
3. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам. (ЯР, теплообменники, ПГ) /П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360с.
4. Попов И. А, Качур С.А. Идентификация процесса поверхностного кипения теплоносителя в активной зоне АЭУ с ВВЭР // Севастополь: Сб.науч.тр. СНУЯЭиП. – 2009. – Вып.4(32). – С.68 -76.
5. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача – М.: Атомиздат, 1977. – 352с.


**References**


1. Ostrejkovskij V.A. *Ekspluataciya atomnyh stancij* [Exploitation of the atomic stations] Moscow, Energoatomizdat, 1999, 928 p.
2. Alekseev B.A.. *Opredelenie sostoyaniya (diagnostika) krupnyh turbogeneratorov* [Determination of the condition (diagnostics) of large turbo generators] Moskow, Iz-vo NC EMAS, 2001, 152p.
3. Kirilov P.L., Yur'ev Yu.L., Bobkov V.P. *Spravochik po teplogidravlicheskim raschyotam* [Reference book upon heat-hydraulic accounts]. Moskow, Energoizdat, 1990, 360p.
4. Popov I.A., Kachur S.A. Identification of process of the superficial boiling of coolant in the active zone APP with PWR. *Sevastopol: Sb.nauch.tr. SNUYaEiP*, 2009, No 4(32), pp. 68-76.
5. Novikov I.I., Voskresenskij K.D. *Prikladnaya termodinamika I teploperedacha* [Applied thermodynamics and heat] Moskow, Atomizdat , 1977, 352p.

УДК 621.039.53

# Неразрушающие методы анализа ядерных материалов в области учета и контроля

А.Н. Фролова, Ю.В. Браславский, А.В. Сукрушев, Л.Н. Пичугова.
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,г. Севастополь, 299053, Россия , ANFrolova@sevsu.ru*

Статья поступила 04.02.2022 г.; после доработки 08.02.2022 г.

***Аннотация***

*В порядке обсуждения рассматриваются действующие нормативные документы в области учета и контроля ядерных материалов. В основной части рассматриваются методы измерений ядерных материалов. Основное внимание уделяется оборудованию для измерения ядерных материалов методом гамма-спектрометрии. В результатах и исследованиях выделены преимущества применения гамма-спектрометрии как неразрушающего контроля ядерных материалов.*

*Ключевые слова:* оборудование для измерения ядерных материалов; радиационная безопасность; методы измерения ядерных материалов.

# Non-destructive methods of nuclear materials analysis in the field of accounting and control

A.N. Frolova, Y.V. Braslavskiy, A.V. Sukrushev, L.N. Pichugova.
*Sevastopol State University, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia, , ANFrolova@sevsu.ru*

Received 04.02.2022 y.; received in final form 08.02.2022 y.

***Abstract***

*In the order of discussion, the current regulatory documents in the field of accounting and control of nuclear materials are considered. In the main part, methods of measuring nuclear materials are considered. The main focus is on equipment for measuring nuclear materials by gamma spectrometry. The results and studies highlight the advantages of using gamma-ray spectrometry as a non-destructive testing of nuclear materials.*

*Keywords:* equipment for measuring nuclear materials; radiation safety; methods for measuring nuclear materials.

## Введение

Одним из видов деятельности в области использования атомной энергии является учет и контроль ядерных материалов (ЯМ).

Основной целью государственной системы учета и контроля является:

- обеспечение постоянного контроля наличного количества ЯМ в местах его нахождения, во время его перевозки и при изменении его инвентарного количества;
- обеспечение сохранности, выявления и предотвращения нарушений и аномалий в учете и контроле ЯМ, потерь, несанкционированного использования и хищения ЯМ;
- предоставление органам государственной власти Российской Федерации, органам управления использованием атомной энергии, органам государственного регулирования безопасности при использовании атомной энергии и другим федеральным органам исполнительной власти необходимой для выполнения ими своих полномочий информации о наличии и перемещении ЯМ, включая их перемещение через Государственную

границу Российской Федерации на российском участке таможенной границы Евразийского экономического союза;

- обеспечение необходимых условий для применения гарантий Международного агентства по атомной энергии, а также реализации двусторонних договоренностей о контроле за ЯМ [1].

Для того чтобы учет был эффективным, необходимо проводить независимые измерения для проверки данных о количестве и изотопном составе ЯМ, представленных в учетных документах.

Система измерений ЯМ является неотъемлемой составляющей Государственной системы учета и контроля ЯМ, целью которой, является обеспечение определения количества ЯМ в местах обращения с ними в пределах установленных погрешностей.

Измерения, относящиеся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений, должны выполняться по аттестованным методикам (методам) измерений, за исключением методик (методов) измерений, предназначенных для выполнения прямых измерений, с применением средств измерений утвержденного типа (при наличии действующих свидетельств о поверке данных средств измерений). Результаты измерений должны быть выражены в единицах величин, допущенных к применению в Российской Федерации [1].

Средства измерительной техники для измерений ЯМ должны иметь технические характеристики, обеспечивающие установленные границы неопределенности измерений и отвечать требованиям действующих нормативно-правовых актов по метрологии и другим нормативным документам.

Калибровку или поверку средств измерительной техники проводят организации, которые в установленном порядке аккредитованы на этот вид деятельности [4].

При измерениях ЯМ используются аттестованные эталоны и стандартные образцы. Аттестация эталонов и стандартных образцов, их регистрация, хранение, применение и контроль осуществляются в соответствии с требованиями действующих нормативно-правовых актов по метрологии, других нормативных документов.

Кроме того, сами измерения ЯМ процедура относительно длительная и небезопасная с точки зрения радиационной опасности.

Поэтому все усилия предпринимаются к тому, чтобы свести измерения ЯМ к необходимому минимуму. А непрерывность знаний относительно ЯМ может обеспечивается за счет применения других средств контроля (например, средств контроля доступа)

Все эти вопросы приобретают особую актуальность не только для предприятий, напрямую занимающихся генерацией ядерной энергии, но и для научных заведений, образовательных организаций при работе с ЯМ.

## Постановка задачи

Выполнение измерений ЯМ должны проводить квалифицированные специалисты, имеющие практический опыт работы с ЯМ. К выполнению измерений допускаются лица, не имеющие по состоянию здоровья противопоказаний к работе с ЯМ и не моложе 18 лет [4].

Особое внимание при подготовке специалистов нужно обращать на повышение культуры ядерной и радиационной безопасности ядерных объектов и ЯМ.

Каждый человек, работающий с ЯМ должен осознать:

- -масштабность возможных последствий его собственных ошибок или неправильных действий;
- необходимость четкого выполнение всех правил и процедур в области учета и контроля ЯМ, предусмотренных его должностными обязанностями.

Целью данной работы является изучение методов измерений ЯМ для целей учета и контроля применительно к условиям организаций высшего образования, использующих ЯМ в учебных и научных видах деятельности.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. рассмотреть нормативные документы в области учета и контроля ЯМ;
2. провести обзор методов измерений ЯМ;
3. рассмотреть основное оборудование, применяемое для гамма спектрометрических измерений ЯМ.

## Основная часть

Практически все методы измерений ЯМ – косвенные, то есть о количестве или изотопном составе материала судят по измерению различных величин (чаще всего – радиоактивных излучений), присущих тем или иным материалам.

Рассмотрим основные методы анализа ЯМ, которые делятся на две большие группы:

- разрушающий анализ (РА), заключается в

определении характеристик материала путем взятия и дальнейшего анализа его пробы.

Таким образом, этот вид измерений предполагает непосредственный доступ к материалу и обычно происходит с разрушением физической формы образца или используется для ЯМ в балк-форме:

- неразрушающий анализ (НРА), происходит без изменения химической и физической формы ЯМ.

Классификация разрушающих и неразрушающих методов анализа ЯМ приведена на рис. 1.




**Рис.1** Классификация разрушающих и неразрушающих методов измерений ЯМ

Разрушающий анализ (РА) характеризуется высокой точностью результатов, что очень важно, с точки зрения системы технологических измерений. Однако применение РА– длительная и дорогостоящая процедура, проводится в лабораторных условиях и кроме того, требующая тщательной подготовки проб. РА выполняется высококвалифицированным персоналом. К тому же анализ образцов ЯМ сопряжен с проблемой высокой радиоактивности исходных образцов.

Неразрушающий анализ (НРА) – быстрый и менее сложный по сравнению с РА. В ряде случаев (измерение очехлованных изделий, отложений ЯМ в оборудовании) НРА является единственным способом определения характеристик ЯМ. Однако точность результатов измерений, как правило, значительно уступает аналогичным данным, полученным с помощью РА.

Именно методы НРА наиболее часто применяются в случаях:

- когда требуется провести быстрые и недорогие контрольные измерения;
- при контроле за протеканием технологических процессов;
- когда невозможно произвести представительную выборку;
- когда разрушающие исследования невыполнимы.

Методы НРА ЯМ делятся на две большие группы и базируются на физической основе ядерного излучения, используемого для анализа ЯМ в составе изделия.

Пассивный анализ основан на измерении самопроизвольного излучения (гамма, рентгеновского, нейтронного) материала, служащего его «подписью».

Активный анализ включает облучение подлежащих контролю предметов посторонним источником радиации (нейтронами, рентгеновским излучением или гамма-излучением) с целью вызвать вторичное излучение ЯМ. Испускаемые при этом вторичные излучения (нейтроны, рентгеновские или гамма-кванты) интерпретируются как «подписи» для определения количества и состава присутствующего делящегося материала.

При этом разнообразие видов индуцированного излучения, способов их анализа и источников внешнего облучения определяет возможности активных методов, а, следовательно, и необходимость использования в конкретных условиях их применения. Между этими двумя методами контроля существует принципиальная разница, которая и определяет область их применения. При пассивном методе анализа ЯМ может использоваться информация от собственного гамма- или нейтронного излучения анализируемого вещества, что не требует применения каких-либо внешних источников облучения и поэтому значительно упрощает конструкцию установок. Это является большим преимуществом

пассивного метода контроля, и большинство существующих в практике устройств основано на этом принципе. Однако собственное излучение ранее необлучённых ЯМ может иметь слабую проникающую способность и сравнительно низкую интенсивность. Поэтому принципиальным недостатком пассивных методов контроля следует считать экранировку внутренних слоев вещества внешними, что не позволяет анализировать гетерогенные структуры тепловыделяющих элементов или их «толстые» образцы .

Этот недостаток в значительной степени устраняется при активном методе контроля, так как подбор внешнего источника облучения образцов, его интенсивности и вида вторичного индуцированного излучения значительно увеличивает возможности анализа ЯМ (например топлива). В качестве источников внешнего облучения возможно использование источников с различным спектром нейтронов и гамма-квантов, что даёт возможность решить практически любую задачу контроля топлива. При этом появляется возможность в качестве источников нейтронов использовать модулированные по времени источники, которые в сочетании с различными замедлителями нейтронов, реализуют в одной облучательной установке различные энергии нейтронов, что значительно расширяет возможности контроля ЯМ. В качестве источников нейтронов можно применять ядерные реакторы, ускорители заряженных частиц, нейтронные генераторы, а также радиоизотопные источники. В некоторых установках активного контроля могут быть также использованы источники гамма-излучения[6].

Пассивные методы НРА классифицируются как анализ гамма-излучения, нейтронный анализ и калориметрия.

В этой статье рассмотрим только методы неразрушающего анализа, путем измерения гамма-излучений урана, которые являются хорошо разработанными и наиболее распространенными. Они позволяют быстро получить контрольный результат при минимальных затратах времени.

Гамма спектрометрические методы используются при следующих измерениях ЯМ:

- обогащения урана;
- изотопного состава;
- отработавшего топлива;
- отложений ЯМ, остающихся в оборудовании.

Интенсивность и энергетический спектр гамма-излучения, испускаемого при самопроизвольном распаде ядра, являются уникальными характеристиками этого ядра. Эти характеристики лежат в основе большинства методов анализа с помощью гамма-излучения: путем подсчета гамма-квантов с определенной энергией оказывается возможным определить число ядер, которые испускают данное излучение.

Детекторы образуют выходные импульсы, амплитуды которых пропорциональны энергии, потерянной в детектирующей среде падающими фотонами. Измерительная система включает метод анализа всех входных импульсов по амплитудам и представления их спектра. Основным инструментом для выполнения этой задачи является многоканальный анализатор (МКА). Конечным результатом многоканального анализа является гистограмма (спектр) зарегистрированных выходных импульсов, отсортированных по амплитуде. Спектр амплитуд импульсов представляет собой непосредственное отражение энергетического спектра взаимодействий гамма-квантов в детектирующей среде и составляет спектрометрическую информацию, используемую в НРА.

На рисунке 2 представлена блок-схема гамма-спектрометрической системы на базе цифрового многоканального анализатора.




**Рис.2** Блок-схема гамма-спектрометрической системы на базе цифрового многоканального анализатора.

Измерительная система начинается с детектора, в котором взаимодействие гамма-излучения с веществом приводит к образованию слабого электрического сигнала, пропорционального потерянной энергии, далее представлены составные части системы в порядке, в котором электрический сигнал проходит через измерительную систему.

Детекторы образуют выходные импульсы, амплитуды которых пропорциональны энергии, потерянной в детектирующей среде падающими фотонами. Назначением электронных устройств, которые следуют за детектором, является обеспе-

чение точного представления амплитудно-импульсного спектра и выделение из этого спектра требуемой информации об энергии и интенсивности гамма-излучения.

Для регистрации гамма-квантов и их энергий используется различные типы детекторов.

Наиболее применяемыми детекторами для целей НРА являются сцинтилляционные и полупроводниковые детекторы. Они более предпочтительны для получения детальных спектральных характеристик в энергетическом диапазоне, типичном для излучения урана (приблизительно 100-1000 кэВ). Основными характеристиками детекторов гамма излучения являются: энергетическое разрешение и абсолютная эффективность.

Энергетическое разрешение детектора — это мера его способности различать (разрешать) два пика, которые близки друг к другу по энергии. Параметром, используемым для указания разрешения детектора, является полная ширина фотопика (пика полного поглощения) на половине его высоты (ПШПВ – FWHM, называемая полушириной пика). Если предположить, что фотопик имеет стандартную форму распределения Гаусса, полуширина дается уравнением:

$$ПШПВ = 2\sigma \cdot \sqrt{\ln 2}$$

где σ — параметр ширины распределения Гаусса.

Абсолютная эффективность – это отношение количества гамма-квантов, зарегистрированных детектором ($n_{det}$), к количеству гамма квантов, испущенных источником ($n_{em}$) [5].

$$\varepsilon_{abs} = n_{det}/n_{em}.$$

Сейчас изготовители полупроводниковых детекторов в основном используют сверхчистый германий. Детекторы из этого материала допускают хранение при комнатной температуре, и только при выполнении измерений их необходимо охлаждать до криогенных температур.

Для различных применений изготавливаются планарные и коаксиальные детекторы, а также коаксиальные детекторы с колодцем для измерения малых активностей. Диапазон энергий регистрируемых квантов гамма-излучения определяется технологическими и конструктивными особенностями германиевых детекторов и может лежать в пределах от единиц кэВ до 10 мэВ. Энергетическое разрешение германиевых детекторов, как правило, приводится для линии 1332 кэВ ( $^{60}$Co) и 122 кэВ ( $^{57}$Co). Значение разрешения германиевых детекторов промышленного изготовления для этих линий обычно составляет 1,75÷2.2 кэВ и 500÷750 эВ соответственно. Абсолютная эффективность примерно 60% в зависимости от типа детектора. Пример спектра гамма-излучения измеренный германиевым детектором приведен на рис.3.

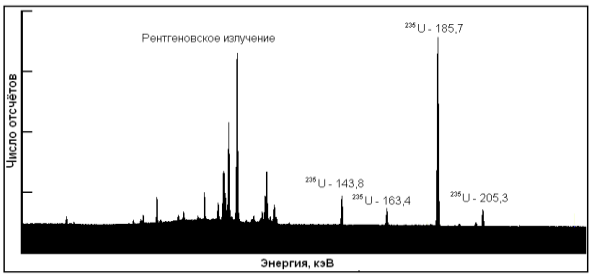



**Рис. 3** Спектр гамма-излучения урана, измеренный Ge детектором

Помимо германия в гамма-спектрометрии применяются и другие полупроводниковых материалов, например CdTe (теллурид кадмия). Для измерений выгодно иметь детекторы высокого разрешения, работающие при комнатной температуре, тем самым, исключая необходимость в громоздком оборудовании для охлаждения детектора. Работа при комнатной температуре таких полупроводниковых материалов, как CdTe была всесторонне исследована. Их более высокие средние атомные номера обеспечивают большую фотоэлектрическую эффективность на единицу объема материала. Детекторы из CdTe, CdZnTe могут быть применены, в частности, для предварительного контроля активности и радиационной обстановки, для подтверждающих измерений в учете и контроле ЯМ, для верификации ЯМ. По энергетическому разрешению детекторы из CdZnTe уступают германиевым, но отсутствие криогенных систем позволяет создать на основе детекторов из CdZnTe компактные и удобные в эксплуатации приборы для гамма-спектрометрии. Таким образом, существует фактическая возможность использования CdTe или CdZnTe детекторов для дистанционного контроля радионуклидов в топливосодержащих материалах. По чувствительности и по отсутствию влияния фона, имеющиеся в настоящее время детекторы, удовлетворяют условиям измерений. Их энергетическое разрешение на линии 662 кэВ ($^{137}$Cs) составляет 9-25 кэВ.

Абсолютная эффективность колеблется от 30-50% в зависимости от типа детектора, что во многих практических случаях достаточно для анализа смеси радионуклидов радиоактивных

отходов (РАО) и отработанного ядерного топлива (ОЯТ).

В применениях неразрушающего гамма анализа широко используется сцинтилляционный детектор NaI(Tl). Пики полного поглощения, образованные детектором NaI, гораздо шире, чем образованные германиевым детектором.

Разрешение детекторов NaI находится в диапазоне от 20 до 60 кэВ. Абсолютная эффективность достигает 35-95% в зависимости от типа детектора. Это проиллюстрировано на рис. 4, где множество деталей, присутствующих в германиевом спектре гамма-излучения урана, потеряно в соответствующем спектре от NaI.

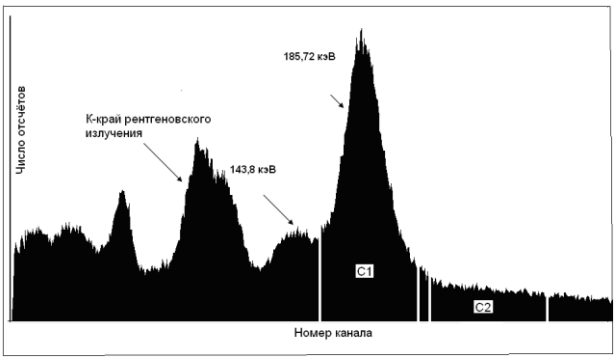



**Рис.4** Спектр гамма-излучения урана, измеренный детектором NaI(Tl)

НРА имеет различные цели, которые могут диктовать выбор разных детекторов. Дополнительным фактором выбора является рассматриваемый с точки зрения практического применения энергетический диапазон гамма-излучения (или рентгеновского излучения).

Другие факторы, такие как стоимость и портативность, могут диктовать использование менее дорогих и более миниатюрных сцинтилляционных детекторов NaI с сопутствующей потерей хорошего энергетического разрешения.

В последние годы стали доступны детекторы высокого разрешения с небольшими сосудами Дьюара с жидким азотом, что позволяет уменьшить размеры детектирующей системы до размеров детекторов NaI. Однако стоимостные соображения все еще заставляют отдавать предпочтение сцинтилляционному детектору перед детектором высокого разрешения.

Для детектора существует несметное количество вариаций размеров, формы, конфигурации внешнего оформления, эксплуатационных характеристик и цены.

Выбор детектора должен проводиться с учетом технических требований, которые определяются условиями применения, а также не технических, но часто решающих требований, определяемых бюджетными ограничениями.

Детектор с высоким разрешением обычно дает более точные результаты анализа, чем детектор с низким разрешением. Легче точно определить площадь пика полного поглощения в сложном спектре, когда пики не перекрываются, а вероятность перекрытия меньше для более узких пиков. Непрерывный фон под пиком полного поглощения легче вычесть из спектра с высоким разрешением, поскольку фон в этом случае является меньшей частью от общей интенсивности в области пика.

Площади пиков полного поглощения также легче вычислить в спектрах с высоким разрешением, поскольку уменьшается интерференция от комптоновского рассеяния на малые углы. Гамма кванты, которые подверглись рассеянию на малые углы, теряют лишь небольшое количество энергии. Если эти рассеянные гамма кванты все еще попадают в область пика полного поглощения, вычисленная площадь пика полного поглощения, вероятно, будет неправильной. Эту проблему можно минимизировать, используя детектор высокого разрешения, который дает узкие пики полного поглощения.

Сложность спектра оказывает влияние на выбор детектора; чем сложнее анализируемый спектр, тем более желательным становится высокое разрешение.

Вторым параметром, который следует учитывать при выборе детектора, является его эффективность, определяющая ожидаемую скорость счета, время измерения, необходимое для достижения заданной точности, и чувствительность, которая может быть достигнута. Стоимость конкретного типа детектора тем выше, чем выше его эффективность, но заданную эффективность в детекторе NaI низкого разрешения дешевле получить, чем в германиевом детекторе высокого разрешения. Существуют весомые причины использования менее дорогого детектора с меньшим разрешением, если он может обеспечить удовлетворительные результаты анализа.

Рассмотрим особенности методик измерений по гамма-излучению:

- методика гамма-измерений бесконечных образцов;
- методика анализа по отношению пиков.

Методика измерения бесконечных образцов используется для измерения обогащения урана.

Она включает в себя регистрацию излучения образца урана через канал коллиматора детектором гамма-излучения.

Если глубина образца вдоль оси коллиматора намного больше, чем длина свободного пробега квантов с энергией 185,7 кэВ в материале образца, то все образцы со сходным физическим составом будут представлены одним и тем же видимым объемом. Для многих урановых материалов критерий "бесконечной" толщины удовлетворяется при достаточно малых толщинах образцов урана.

Однако, поскольку мы заглядываем внутрь образца не глубже, чем на определенное расстояние, измерения обогащения по гамма-излучению часто относятся только к поверхности уранового материала. Таким образом, чтобы измерение обогащения было значимым для всего образца, материал должен быть однородным по изотопному составу. Эта является критерием так называемой «бесконечной» толщины.

Обогащение определяется по интенсивности гамма-квантов изотопа $^{235}U$ с энергией 185,7 кэВ. Если образец достаточно толстый, то детектора достигают гамма-кванты с энергией 185,7 кэВ только от части общего объема образца, ввиду сильного поглощения квантов этой энергии в типичных материалах, в которых содержится уран. "Видимый объем" образца определяется коллиматором, геометрией детектора и длиной свободного пробега излучения с энергией 185,7 кэВ в материале образца.

Для однородных образцов одного и того же состава этот «видимый объем» содержит одинаковое количество урана, так что интенсивность излучения гамма-квантов с энергией 185,7 кэВ пропорционально концентрации $^{235}U$ в общей массе урана, т.е. пропорциональна его атомарному содержанию в образце.

Методика анализа по отношению пиков используется для произвольных "небесконечных" образцов (тонкой фольги, отложений загрязнений или разбавленных растворов) где трудно оценить толщину образца D достаточно точно. Не выполняется главное условие "бесконечной" толщины - глубина образца вдоль оси коллиматора должна быть намного больше, чем длина свободного пробега квантов с энергией 185,7 кэВ в материале образца, для того чтобы образцы со сходным физическим составом были представлены одним и тем же видимым объемом. Методика отношения пиков требует измерить отношения интенсивностей гамма-излучения основных изотопов и использовать эту информацию для определения обогащения урана.

Преимущество метода измерения по отношениям пиков, в том, что этот метод позволяет определять обогащение урана без использования стандартных образцов обогащения или без определения зависящих от геометрии измерения калибровочных постоянных. При этом образцы не обязаны удовлетворять критерию "бесконечной" толщины. Кроме того, поправки на относительную эффективность делаются для каждого образца и включают поглощение не только в материале образца, но и в контейнере и во всех внешних поглотителях. Недостатками этой методики являются:

• низкая интенсивность излучения дочерних продуктов $^{238}U$ для высокоэнергетического метода;

• необходимость установления векового равновесия между материнскими и дочерними изотопами;

• необходимость изотопной однородности образца[6].

## Заключение

На сегодняшний день имеется 2 группы наиболее широко применяемых типов детекторов: сцинтилляционные и полупроводниковые.

Каждая из групп имеет свои недостатки и достоинства, поэтому тип детектора для измерения характеристик ЯМ выбирается исходя из потребностей и условий для проведения измерений. Сложность спектра оказывает влияние на выбор детектора; чем сложнее анализируемый спектр, тем более желательным становится высокое разрешение, как у германиевых детекторов.

Для проведения «повседневных» измерений или подтверждающих измерений вполне достаточно NaI детектора. Но данный тип детекторов вытесняют более точные полупроводниковые детектора на основе CdTe, которые не требуют охлаждения жидким азотом и более компактны.

Методики неразрушающего анализа путем измерения гамма-излучений урана являются хорошо разработанными и наиболее распространенными, позволяют быстро получить контрольный результат при минимальных затратах времени.

Применение гамма-спектрометрии в учете и контроле ядерных материалов имеет следующие преимущества:

- с помощью гамма-спектрометрии можно производить неразрушающие измерения обогащение урана и определить изотопный

состав образцов;

- аппаратура, используемая для анализа относительно проста и доступна;
- при измерениях обогащения и изотопного состава ядерных материалов точность измерения находится в пределах 0,1-5%; при измерении содержания ядерных материалов в отходах точность измерения составляет 15-20%, что достаточно для подтверждающих измерений.

## Список литературы


1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 18 ноября 2019 г. N 438 "Об утверждении федеральных норм и правил в области использования атомной энергии "Основные правила учета и контроля ядерных материалов" (НП-030-19)" [Электронный источник] URL: https://base.garant.ru/73875580/#friends (дата обращения 11.01.2022).
2. Федеральный закон от 21.11.1995 N 170-ФЗ (ред. от 30.04.2021) «Об использовании атомной энергии» [Электронный источник] URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=390732 (дата обращения 11.01.2022).
3. Постановление Правительства РФ от 6 мая 2008 г. N 352«Об утверждении Положения о системе государственного учета и контроля ядерных материалов» [Электронный источник] URL: https://base.garant.ru/193243 (дата обращения: 11.01.2022).
4. Стандарт отрасли. Учет и контроль ЯМ. Система измерений. Утвержден Приказом Министра Минатома России № 288 от 13.06.2002 г. [Электронный источник] URL: https://base.garant.ru/193243 (дата обращения: 11.01.2022).
5. Д. Райлли, Н. Энсслин, Х. Смит, С. Крайнер Пассивный неразрушающий анализ ядерных материалов: Пер. с англ. – М.: ЗАО “Издательство Бином”, 2000. – 720 с.:, ил.
6. Бушуев А.В. Методы измерения ядерных материалов: Учебное пособие. М: МИФИ, 2001.-172 с.
7. Глебов В.Б., Измайлов А.В., Румянцев А.Н. Введение в системы учета, контроля и физической защиты ядерных материалов: Учебное пособие. М.: МИФИ, 2001.-196 с.


## References


1. Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision N 438 dated November 18, 2019 "On Approval of Federal Norms and Rules in the Field of Atomic Energy Use "Basic Rules for Accounting and Control of Nuclear Materials" (NP-030-19)" [Electronic source] (date accessed: 11.01.2022).
2. Federal Law No. 170-FZ of 21.11.1995 (as amended on 30.04.2021) "On the Use of Atomic Energy" [Electronic source] URL: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=390732 (date accessed: 11.01.2022).
3. Resolution of the Government of the Russian Federation of May 6, 2008 No. 352 "On approval of the Regulations on the system of state accounting and control of nuclear materials" [Electronic source] URL: https://base.garant.ru/193243/ (accessed 11.01.2022).
4. Industry standard. Accounting and control of YAM. System of measurements. Approved by the Order of the Ministry of the Ministry of the Russian Federation No. 288 dated 13.06.2002 [Electronic source] URL: https://base.garant.ru/193243 (accessed 11.01.2022).
5. D. Reilly, N. Ensslin, H. Smith, Jr., S. Krainer Passive non-destructive analysis of nuclear materials: Trans. from English - M.: CJSC "Binom Publishing", 2000. - 720 p.
6. Bushuev A.V. Methods of measuring nuclear materials: Textbook. Moscow: MEPhI, 2001.-172 p.
7. Glebov V.B., Izmailov A.V., Rumyantsev A.N. Introduction to systems of accounting, control and physical protection of nuclear materials: Textbook. Moscow: MEPhI, 2001.-196 p.

УДК 621.039.51

# Реализация замкнутого ядерного топливного цикла в России

В.В. Шаповаленко[1]
[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г.Севастополь, 299053, Россия,* [1]shapovalenkovita@rambler.ru

Статья поступила 27.01.2022 г. ; после доработки 31.01.2022 г.

***Аннотация***

*Представлен обзор предприятий, входящих в состав открытого ядерного топливного цикла России, а также предприятий и научно-исследовательских центров, необходимых для создания замкнутого ядерного топливного цикла. Рассмотрены основные проблемы и перспективы замыкания ядерного топливного цикла в России.*

*Ключевые слова:* замкнутый ядерный топливный цикл, радиоактивные отходы, предприятия ядерного топливного цикла, реакторы с жидкометаллическим теплоносителем, БН-600, БН-800, БРЕСТ-ОД-300, жидкосолевой реактор, регенерированное топливо.

# Implementation of the closed nuclear fuel cycle in Russia

V.V. Shapovalenko[1]
Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[1]shapovalenkovita@rambler.ru

Received 27.01.2022 y. .; received in final form 31.01.2022 y.

***Abstract***

*A review of enterprises included in the open nuclear fuel cycle of Russia, as well as enterprises and research centers necessary to create a closed nuclear fuel cycle are presented. The main problems and prospects for creating a closed nuclear fuel cycle in Russia.*

*Keywords:* closed nuclear fuel cycle, radioactive waste, nuclear fuel cycle enterprises, reactors with liquid metal coolant, BN-600, BN-800, BREST-OD-300, liquid salt reactor, regenerated fuel.

## Введение

Создание замкнутого ядерного топливного цикла давняя мечта ядерщиков, которая хоть и медленно, постепенно становится реальностью.

Замкнутый ядерный топливный цикл состоит из таких этапов как добыча урана, обогащение топлива, изготовления ядерного топлива и эксплуатация его в составе конструкции тепловыделяющей сборки в объеме активной зоны ядерного реактора, переработка отработавшего ядерного топлива, захоронение радиоактивных отходов.

Основное преимущество замкнутого топливного цикла в том, что создается возможность после переработки отработавшего топлива, выделения из него недовыгоревшего урана и плутония, создать новое топливо для повторного его использования в активной зоне реактора.

Данный технологический процесс позволяет снизить объем имеющегося отработавшего топлива, который многие годы накапливается и хранится на площадках Горно – химического комбината.

Кроме того, такой подход позволяет более рационально использовать имеющиеся природные ресурсы урановой руды с учетом того, что в последнее время наблюдается рост строительства новых станций с повышенной мощностью, что в свою очередь требует большей загрузки в

активную зону ядерного топлива.

## Цель и постановка задачи

Обзор предприятий, формирующих на сегодняшний день открытый ядерный топливный цикл и строящихся предприятий для осуществления замкнутого ядерного топливного цикла.

Анализ основных проблем, связанных с реализацией программы создания замкнутого топливного цикла.

## Обзор предприятий, работающих в составе ядерного топливного цикла России

**Добыча урана**

В России добычей урана занимается Урановый холдинг Атомредмедзолото «АРМЗ», под контролем которого находятся уранодобывающие предприятия, основными из них являются:

- Приаргунское производственное горно-химическое объединение имени Е.П Славского», распложенное г. Краснокаменск, Читинской области. Добыча урана осуществляется шахтным способом.
- «Хиагда» (Бурятия). Добыча урана осуществляется по технологии скважинного подземного выщелачивания.
- «Далур» (Курганская область). Добыча урана осуществляется по технологии скважинного подземного выщелачивания.

По данным Всемирной ядерной ассоциации на 2019 год Россия занимает 7 место по добыче урана в мире.

**Обогащение урана**

В природном уране доля $^{235}U$ составляет не более 0,72% , в большинстве реакторных установок используется обогащенный уран.

Для ядерных реакторов, работающих на тепловом спектре нейтронов обогащение по $^{235}U$ может достигать до 7%, для реакторов, работающих на быстром спектре нейтронов до 30%, для некоторых транспортных ядерных установок свыше 20%.

В России процесс обогащения по урану $^{235}U$ осуществляется в газовых центрифугах, где газообразное соединение гексафторид урана раскручивается с огромной скоростью 1500 оборотов в секунду. При этом более тяжелый изотоп $^{238}U$ «отжимается» к стенке, тогда как более легкий $^{235}U$ остается у оси вращения. Таким образом, удается разделить изотопы. Для повышения степени обогащения $^{235}U$ центрифуги объединяют в каскады, подавая с выхода каждой ступени частично обогащенный материал на вход следующей ступени.

Производством газовых центрифуг в России управляет Инжиниринговый центр «Русская газовая центрифуга».

Непосредственно обогащением урана занимаются четыре предприятия:

- Ангарский электролизный химический комбинат (г. Ангарск, Иркутская область).
- Производственное объединение «Электрохимический завод» (г. Зеленогорск, Красноярский край).
- Уральский электрохимический комбинат (г. Новоуральск, Свердловская область).
- Сибирский химический комбинат (г. Северск, Томская область).

Их производственные мощности позволяют России в лице Госкорпорации «Росатома» занимать 40% мирового рынка услуг по обогащению урана и планировать увеличение этой доли.

**Производство топлива**

Основным топливом ядерных реакторов является диоксид урана, обогащенный по делящемуся изотопу $^{235}U$. Поэтому после обогащения гексафторид урана переводится в оксидную форму – порошок. Затем в диоксид урана, порошок, добавляют пластификаторы и путем прессования формируют топливную таблетку, далее обжигают в специализированных шкафах при температурах около 1750°С, а затем размещают внутри циркониевых трубок - тепловыделяющих элементов (твэлов). Из твэлов собирают тепловыделяющие сборки, размещаемые в ядерном реакторе.

Непосредственно изготовлением ядерного топлива заняты:

- Машиностроительный завод (г.Электросталь, Московская область);
- Новосибирский завод химконцентратов (г.Новосибирск, Новосибирская область).

Цирконий для изготовления твэлов производят на Чепецком механическом заводе (г.Глазов, Удмуртская Республика).

Топливная компания «ТВЭЛ» является монопольным поставщиком ядерного топлива на все российские атомные электростанции (АЭС), а также на все транспортные, промышленные и исследовательские реакторы в нашей стране.

Кроме того, «ТВЭЛ» ведет работу по созданию принципиально нового вида смешанного уран-плутониевого топлива, используя различные подходы в технологии производства с учетом его эксплуатации в реакторах ВВЭР-1200,

ВВЭР-1300 и БН-800.

Продолжается работа над созданием смешанного нитридного топлива для реакторов на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем АЭС «БРЕСТ-ОД-300».

Кроме того, топливная компания «ТВЭЛ» является одним из основных поставщиков ядерного топлива на зарубежные атомные станции, а также станции, построенные за рубежом по российскому проекту.

**Эксплуатация топлива на АЭС**

Атомная энергетика России состоит 50% из реакторов ВВЭР (водо-водяной реактор под давлением, работающий на тепловых нейтронах), 50% из реакторов РБМК-1000 (водо-графитовый реактор, работающий на тепловых нейтронах) и 2-х реакторов БН (реактор с натриевым теплоносителем, работающий на быстром спектре нейтронов).

Период эксплуатации тепловыделяющих сборок в реакторе, определяется допустимым уровнем выгорания топлива и требованиями, предъявляемыми к химическому составу отработавшего топлива, которые во многом определяют целесообразность и возможность в дальнейшем его переработки.

**Хранение и переработка отработавшего ядерного топлива**

Топливо, отработавшее в активной зоне ядерного реактора, имеет высокий радиационный фон и остаточные тепловыделения. Поэтому после длительной пристанционной выдержки его в бассейне, оно помещается в транспортировочные контейнеры и доставляется к месту длительного хранения в специализированные хранилища.

Все операции с отработавшим ядерным топливом должны осуществляться дистанционно, так как они являются радиационно-опасными для человека.

Однако кроме опасности отработавшее ядерное топливо может приносить и несомненную пользу: оно является сырьем для получения регенерированного ядерного топлива, поскольку содержит в себе недовыгоревший уран $^{235}U$, изотопы плутония $^{239}Pu$ и урана $^{238}U$.

На его базе создается регенерированное РЕМИКС-топливо для ВВЭР, мох-топливо для реакторов БН-800, уран-нитридное, уран-плутоний нитридное топливо для реактора БРЕСТ-ОД-300. Отрабатывается технология создания топливной композиции с включением в нее минорных актинидов для сжигания их в специализированных установках.

Данные работы имеют огромное стратегическое значение для развития ядерной энергетики и создания замкнутого ядерного топливного цикла, а разрабатываемые технологии позволят Госкорпорации «Росатом» занять уверенные и лидирующие позиции на мировом рынке ядерных технологий.

В России переработка отработавшего топлива осуществляется на заводе РТ-1 производственного объединения «Маяк» производительностью 400 тонн/год. На сегодняшний день освоены и применяются технологии по переработки отработавшего топлива транспортных реакторов, ВВЭР-440, исследовательских реакторов, БН-600.

На территории Горно-химического комбината (г.Железногорск, Красноярский край) в 2015 году введен в работу опытно-демонстрационный центр по переработке отработавшего ядерного топлива мощностью 250 тонн в год, в этом же году было запущено производство мохтоплива для реактора БН-800, позже отработана технология переработки отработавшего топлива реакторов ВВЭР-1000.

К 2030 году планируется построить радиохимический завод РТ-2 для переработки отработавшего топлива реакторов ВВЭР-1000 и РБМК-1000 производительностью 1500 тонн/год.

**Обращение с отходами**

В результате работы предприятий Госкорпорации «Росатом», в том числе предприятий по переработки ядерного топлива, а также ряда других организаций, использующих в своей деятельности радиоактивные вещества, образуются радиоактивные отходы.

Они могут находиться в твердой, жидкой и газообразной форме и требуют особо аккуратного обращения.

Конечной стадией обращения с радиоактивными отходами должна стать их надежная изоляция от окружающей среды в специальном могильнике, который позволит предотвратить выход радиоактивных веществ в окружающую среду в течение всего периода их потенциальной опасности, то есть до того момента, пока радионуклиды не распадутся естественным образом. Уменьшение объемов радиоактивных отходов является одной из главных проблем развития ядерной энергетики.

В Российской Федерации обращение с ра-

диоактивными отходами осуществляет специализированная компания:

- ФГУП «Предприятие по обращению с радиоактивными отходами РосРАО»;
- Северное предприятие по обращению с радиоактивными отходами;
- Дальневосточное предприятие по обращению с радиоактивными отходами.

**Научно-исследовательские центры и предприятия, предназначенные для изучения и решения проблем, связанных с реализацией замкнутого топливного цикла**

Для реализации концепции замкнутого ядерного топливного цикла в России необходимо решить следующие задачи:

1) Создать двухкомпонентную атомную энергетику, обеспечив оптимальный состав из реакторов, работающих на тепловом и быстром спектре нейтронов.
2) Обеспечить достаточную научно-исследовательскую базу для отработки технологий по изготовлению надежной конструкции тепловыделяющего элемента с регенерированным топливом с высокими технико-экономическими показателями;
3) Отработать технологии переработки отработавшего топлива реакторов ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, ВВЭР-1300 БН-800, БРЕСТ-0Д-300.
4) Решить проблему утилизации минорных актинидов и снижения объемов захоронения радиоактивных отходов.
5) Разработать инновационные проекты реакторных установок для решения различных задач в ядерной энергетике.

Создание двухкомпонентной ядерной энергетики в России решается за счет строительства энергоблоков с реакторами ВВЭР повышенной безопасности с постепенным замещением ими реакторных установок с уран-графитовыми реакторами. Дополнительно к работающим реакторам БН-600 и БН-800 планируется построить реакторы, работающие на быстром спектре нейронов с натриевым теплоносителем БН-1200 и со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300.

Строительство реактора БРЕСТ-ОД-300 запланировано на площадке Сибирского химического комбината в городе Северске Томской области. Уникальность проекта заключается в том, что на одной площадке будут построены реактор, модуль по производству фабрикации/ рефабрикации уран-плутоний нитридного топлива, а также модуль по переработке облученного топлива. По сути, создается замкнутый топливный цикл в пределах площадки АЭС, чего раньше в мире не было и не проектировалось.

Из этих объектов к 2022 году планируется ввести в эксплуатацию модуль по производству смешанного нитридного топлива.

Для изучения свойств и структуры материалов, создания новых материалов в 2021 году осуществлен энергетический пуск высокопоточного атомного реактора «ПИК» на площадке Петербургского института ядерной физики им. Б. П. Константинова (ПИЯФ) в Гатчине.

Реактор «ПИК» представляет собой современный высокопоточный источник нейтронов, позволяющий изучать вещества на уровне наномасштабов.

Для проведения реакторных испытаний инновационных материалов и макетов элементов активных зон построен многоцелевой исследовательский реактор на быстрых нейтронах (МБИР) в г.Димитрограде.

Через его активную зону проходят специальные каналы, в которых можно установить отдельную петлю со своим теплоносителем, необходимыми параметрами по теплоносителю, своей ТВС.

Основным предназначением реактора МБИР является проведение реакторных испытаний инновационных материалов и макетов элементов активных зон для ядерно-энергетических систем 4-го поколения, включая реакторы на быстрых нейтронах с замыканием топливного цикла.

Для решения проблемы уменьшения объемов накопления радиоактивных отходов проектируется исследовательский жидкосолевой реактор. Предполагаемое его строительство совместно с комплексом производства и переработки топлива запланировано на площадке Горно-химического комбината к 2030 г.

Пока на сегодняшний день прорабатывается его техническое решение.

Жидкосолевой реактор — это установка, в которой активную зону формирует гомогенная расплавленная смесь из фторидов солей и фторида делящегося материала (урана, плутония или тория). В качестве топливной составляющей планируется использовать тетрафторид плутония, растворенный в смеси фторидов лития и бериллия (соль FLiBe). Тепловая мощность проектируемого жидкосолевого реактора составит 10 МВт.

Жидкосолевой реактор проектируется с целью получения практического опыта сжигания

минорных актинидов (америция, кюрия, нептуния) в составе ядерного топлива в активной зоне реакторной установки.

Возможно, в рамках отдельного проекта будет создан фрагмент петли жидкосолевого реактора на базе реактора МБИР.

С учетом увеличивающихся объемов отработанного топлива при малых объемах его переработки требуются дополнительные площади для его складирования. Для решения этой проблемы на территории Горно-химического комбината (ГХК) были дополнительно увеличены площади под «сухое» хранение отработавшего топлива.

Это также в будущем позволит решить проблему выгрузки и дальнейшего размещения отработавшего ядерного топлива всех тепловыделяющих сборок (около 18623 ТВС) со всех реакторных установок РБМК-1000 в виду их вывода из эксплуатации.

Еще одной проблемой являются малые объемы перерабатываемого ядерного топлива.

Для перехода от опытной практики переработки ядерного топлива к промышленным объемам необходимо оптимизировать технологию переработки ядерного топлива с учетом создаваемых новых видов ядерного топлива, выполнить большой объем научно-исследовательской работы в области изучения свойств материалов, дополнительно построить радиохимический завод отработавшего топлива РТ-2, чтобы обеспечить в полном объеме регенерированным топливом, работающие и строящиеся реакторные установки в составе замкнутого ядерного топливного цикла.

## Заключение

Таким образом, в России осуществляется постепенный переход атомной энергетики с открытым ядерным топливным циклом (ВВЭР, РБМК, БН) к закрытому топливному циклу с реакторными установками типа ВВЭР и реакторами, работающими на жидкометаллическом теплоносителе (БН, БРЕСТ).

Целый комплекс построенных и строящихся предприятий (БН-800, ВВЭР-1300, БРЕСТ-ОД-300, «ПИК», «МБИР», жидкосолевой реактор, опытно-демонстрационный центр фабрикации и переработки топлива на Горно-химическом комбинат и на площадке Сибирского химического комбината даст возможность отработать весь комплекс вопросов, связанных с замыканием ядерного топливного цикла, включая производство регенерированного топлива, переработку отработавшего топлива, а также локализацию радиоактивных отходов.

Замыкание ядерного топливного цикла является еще и экономически выгодным аспектом в условиях удорожания добычи урана, связанной с освоением новых месторождений.

А разрабатываемые технологии переработки отработавшего топлива и утилизации радиоактивных отходов делают возможным для России занять лидирующие позиции на мировом рынке ядерных технологий, что сулит дополнительную экономическую прибыть.

## Список литературы

1. Матвеев В.И. Техническая физика быстрых реакторов с натриевым теплоносителем / В.И.матвеев, Ю.С.хомяков; под ред.чл.-корр В.И.Рачкова –М.:Издательский дом МЭИ, 2012. - 356
2. Габараев Б.А. Атомная энергетика 21 века: учебное пособие / Б.А.Габараев , Ю.Б.Смирнов, Ю.С.Черепнин.- М.:Издательский дом МЭИ, 2013. - 250с.
3. Комментарии специалистов Росатома цитируются по газете «Страна Росатом» (приложение «Лаборатория» № 3−4 (62−63).
4. https://www.rosatom.ru

## References

1. Matveev V. I. Technical physics of fast reactors with sodium coolant / V. I. Matveev, Yu. s hamsters; ed. by corresponding member offset V. I. Rachkov, M.:MPEI Publishing house, 2012. - 356
2. Gabaraev B. A. Nuclear energy of the 21st century: textbook / B. A. Gabaraev , Y. B. Smirnov, Y. S. Cherepnin.- M.:Publishing house MPEI, 2013. - 250C.
3. Comments Rosatom specialists tsiti-ruotsia newspaper Rosatom Country (Annex "Laboratory" № 3-4 (62-63).
4. https://www.rosatom.ru

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИТЕМЫ

УДК 620.9

# Использование энергетического потенциала возобновляемых источников для обеспечения потребностей Крымского региона

Гусева Е.В.[1], Бордан Д.Ф.[2], Власов Н.А.[2], Тиман Д.И.[2]
*[1]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», [1]Морской институт, alenaalena73@mail.ru*
*[2]Институт ядерной энергии и промышленности, bordan79@mail.ru,*
*Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.*
*alenaalena73@mail.ru, bordan79@mail.ru,*

***Аннотация***

*В работе приведены возможности использования энергетического потенциала солнечной энергетики в курортно-рекреационном комплексе Крыма, в частности применение гелиоустановок для получения тепловой и электрической энергии. Описаны статистические и экономические исследования применения солнечной энергетики для замещения традиционного органического топлива в энергокомплексе Республики Крым и городе Севастополь.*

*Ключевые слова:* солнечная энергетика, гелиоустановки для получения тепловой и электрической энергии

# Use of energy resources from related sources to ensure the security of the Crimean region

Guseva E.V.[1], Bordan D.F., Vlasov N.A., Timan D.I.
*[1]FGAOU VO "Sevastopol State University", [1]Marine Institute, alenaalena73@mail.ru*
*[2]Institute of Nuclear Energy and Industry[2], bordan79@mail.ru.*
*[1]Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russiya.*
*alenaalena73@mail.ru, bordan79@mail.ru*

***Abstract***

*The paper presents the possibilities of using the energy potential of solar energy in the resort and recreational complex of the Crimea, in particular, the use of solar power plants for obtaining thermal and electrical energy. The article describes statistical and economic studies of the use of solar energy to replace traditional fossil fuel in the power complex of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol*

*Keywords:* solar energy, solar thermal and electrical energy

## Введение

В последние десять лет современное мировое сообщество уделяет значительное внимание развитию и внедрению одного из перспективных направлений экономии топливно-энергетических ресурсов – возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), которые практически неисчерпаемы и, что самое главное, экологически чистые.

Основными факторами, определяющими актуальность данного направления являются:

- обеспечение энергетической безопасности;
- снижение объемов вредных выбросов;
- сохранение собственных запасов энергоресурсов для будущих поколений.

В последние годы деятельность многих ученых и специалистов направлена на поиски путей снижения вредного влияния энергетического сектора на окружающую среду.

Это связано, в первую очередь, с тем, что

при увеличении численности населения, энергопотребление с использованием ядерного топлива, угля, нефти, газа возрастает и, несмотря на внедрение перспективных технологий традиционной энергетики, которые снижают вредные выбросы, экологические проблемы не решаются.

Более того, при производстве энергии с использованием органического топлива, ядерной и термоядерной энергии, кроме вредного влияния на человека, активизируются процессы “теплового загрязнения” окружающей среды.

Существует мнение, что перегрев окружающей среды в целом на 3,5 градуса является критической величиной [1], а это может привести к глобальным изменениям климата и атмосферы, к возникновению “парникового эффекта”, т.к. при увеличении концентрации в атмосфере углекислого газа экологический климат резко ухудшается [1].

То есть создается прецедент: в стремлении получения высокопродуктивного и универсального энергопотребления общество попадает в трудноконтролируемые условия существования и зависимость от использования органического элемента.

Осознавая эти проблемы, и реально оценивая ситуацию, мировое сообщество определило в своем развитии главные тенденции развития современной энергетики, а именно, компромисс:

– широкое использование возобновляемых источников энергии;
– разработку и внедрение высокоэффективных энергосберегающих технологий в традиционной энергетике.

В целом прогнозная оценка потребления различных видов энергоресурсов, с учетом развития энергетической ресурсной базы, за последние 20 лет (2000-2020 г.г.) показывает, что, начиная с 2020 года, будет значительно возрастать доля ВИЭ [1,2].

Особенно возрастут темпы роста новых возобновляемых источников энергии (ветровая, солнечная, геотермальная энергия, биомасса) (Таблица1).

Республика Крым, является тем регионом, где зеркально отражены вышеизложенные проблемы и возможности перспективного развития с использованием энергетического потенциала возобновляемых источников энергии [2].

При этом важным фактором является реальное состояние энергетического хозяйства Крыма, которое определяется уровнем обеспечения энергоносителями, их экологическими и экономическими характеристиками. [3].

***Таблица 1*** *Прогноз распределения мирового энергопотребления за счет возобновляемых источников энергии [1]*

| Год | **Доля возобновляемых источников энергии в общем энергопотреблении, %** | | |
|---|---|---|---|
| | **Традиционные возобновляемые источники энергии** | **Новые возобновляемые источники энергии** | **Сумма** |
| 1980 | 7,5 | 1 | 8,5 |
| 2000 | 10 | 1 | 11 |
| 2020 | 10 | 19 | 29 |
| 2040 | 10 | 40 | 50 |
| 2060 | 10 | 58 | 68 |

На сегодняшний день ситуация весьма сложна: импорт энергоносителей достигает 70%, база оборудования энергетики технически и морально устарела, система энергосбережения желает быть лучшей, и, как следствие – низкий уровень преобразования и транспортирования энергии в энергетической отрасли, что ведет к росту энергозатрат в промышленности, агропромышленном и коммунальном комплексах и, что очень важно, в санаторно-курортной отрасли [4].

И, как следствие, возникают проблемы комфортности жизни и труда населения. Для Крыма актуальной остается не только проблема энергообеспечения, но и сохранения уникальных природных лечебных богатств полуострова. В связи с этим, ВИЭ региона рассматриваются как один из источников стабилизации энергетической отрасли при сохранении экологии [4].

## Постановка целей и задач исследования

Полуостров располагает достаточно высоким потенциалом ветроэнергетических и солнечных ресурсов, а также рядом небольших рек с быстрым течением, систем водообеспечения, на которых могут быть сооружены экономически эффективные мини-ГЭС. Имеются значительные ресурсы геотермальных вод (Таблица 2).

Представленные результаты применительно к современным условиям развития региона

являются весьма оптимистичными, реализация которых требует принятие целого ряда стратегических мер, в том числе,

– организация производства оборудования в сфере ВИЭ;
– сертификация продукции, предназначенной для массового потребителя, на основе данных, полученных в ходе опытно-эксплуатационных испытаний на пилотных объектах;
– подготовка пакета нормативно-правовой документации, определяющей эффективное освоение по всем направлениям ВИЭ;
– создание информационной базы и банка данных по использованию ВИЭ.

***Таблица 2.*** *Энергетический потенциал нетрадиционных источников энергии Республики Крым*

| источники энергии | Теоретический потенциал млн. МВт*ч/год | Рекомендуемый объем использования | |
|---|---|---|---|
| | | млн. МВт*час/год | тыс. т у.т. |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| Геотермальная энергия | 790 000 | 0,226 | 81 |
| Ветровая энергия | 96 000 | 1,042 | 375 |
| Солнечная энергия | 32 200 | 0,208 | 75 |
| Биоэнергетика с/х отходов | 0,56 | 0,067 | 24 |
| Малая гидроэнергетика | 0,21 | 0,028 | 10 |
| ИТОГО: | 920000 | 1,571 | 565 |

*Состояние окружающей среды Крыма*

На сегодняшний день для Крыма приобретает важное значение создание экологически чистых условий для развития наиболее экономически выгодных отраслей хозяйствования, в первую очередь, курортно-оздоровительного комплекса. Это позволит привлечь на отдых людей и получить доход от этого бизнеса [4].

Экология Крыма определяется состоянием окружающей среды. Анализ загрязнения атмосферного воздуха региона показал, что основными источниками выбросов является промышленность и автотранспорт (Таблица 3).

Количество выбросов по годам практически не меняется, однако из-за снижения уровня промышленного производства изменилась приоритетность процента выбросов по Крыму, имеет место возрастание вредных выбросов от автотранспорта. Это связано не только с увеличением числа транспортных средств, особенно в летнее время, но и от качества используемого топлива

По данным Рескомэкоресурсов Крыма состав вредных выбросов в окружающую среду характеризуется использованием органического топлива объектов тепловой и электрической энергии.

***Таблица 3*** *Динамика выбросов по Республике Крым загрязняющих веществ в атмосферу*

| Выбросы | годы | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1996 | 2000 | 2010 | 2020 |
| Общее количество, тыс.т | 122,5 | 123,4 | 125,9 | 118,1 |
| От стационарных источников тыс.т | 61,65 | 33,5 | 32,6 | 31,7 |
| От автотранспорта, тыс.т | 60,8 | 89,9 | 93,3 | 86,5 |

Основной объем определений приходится на наличие твердых веществ, сернистого ангидрида и окислов азота. По наличию указанных выбросов, Крым, особенно побережье Черного и Азовского морей, входят в «Зону экологического бедствия» [4].

Учитывая тот факт, что состояние окружающей среды имеет для государства большую социальную значимость, создание условий для использования потенциала ВИЭ является своевременным и приоритетным.

*Показатели солнечного излучения в Крыму*

Материал, представленный выше, является основополагающим при рассмотрении одного из стратегических направлений в развитии ВИЭ в России – формирования нормативно-правовой основы использования солнечного излучения на основе гелиоустановок на базе мониторинга предприятий санаторно-курортного комплекса

Республики Крым.

Приоритетность использования солнечной энергии в Крыму обусловлена рядом причин как природного, так и социально-экономического характера.

Солнечное излучение считается наиболее емким, естественным и доступным [5-7]. Поток суммарного солнечного излучения на поверхность Земли составляет $795x10^{15}$ кВт.час [1,4], достигая своего максимума в полдень на протяжении суток: в летнее время и минимума в зимнее время. Различным регионам планеты присуща разная степень радиации в течение года.

Просчитано, что ресурс солнца, поступающий на Землю почти в 10000 раз превышает объем потребления традиционного органического топлива, составляющий по данным 1991 года – $95,8x10^{12}$ кВт.час. Если за основу принять площадь Земли $149x10^{12}$ м$^2$ (29% земной поверхности), то объем суммарного солнечного излучения почти в 2500 раз превышает мировой спрос на энергию. Для Крыма, поверхность которого составляет $27x10^9$ м$^2$, энергетический показатель суммарного солнечного излучения равен – $34,5x10^{12}$ кВт.час значительно превышает суммарное потребление энергии, равное $6,5x10^9$ кВт.ч (2002 год). Учитывая то, что на поверхность земли поступает только часть солнечной энергии, тем не менее, существует достаточно большой запас возможности ее использования.

Изменению подвергаются составляющие суммарной солнечной радиации- прямая и рассеянная [6]. В Таблице 4 представлено изменение солнечного излучения в Крыму.

При этом важным показателем является температура окружающего воздуха. С учетом данных показателей рассчитывается среднесуточная энергетическая экспозиция суммарного излучения на облицованную поверхность с учетом угла наклона, который равен широте, где расположена территория. Так для Крыма, который расположен в крайней южной части Российской Федерации, он равен 45ºС. Расчеты, с учетом всех составляющих позволяют смоделировать гелиосистемы, эффективно работающие в течение года [7]. При этом учитывается продолжительность солнечного сияния в течение года и суммарная солнечная радиация на горизонтальную поверхность.

Для Крыма число часов инсоляций в год изменяется от 2170 до 2440 в год (Таблица 5), большая часть которых приходится на теплое время года, а именно весенне-летне-осенний периоды (до 300 дней в год).

***Таблица 4*** *Среднесуточные показатели для проектирования гелиосистем*

| Месяц | Среднесуточные показатели | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Прямое излучение на горизонтальной поверхности, Вт*ч/м² | Рассеянное излучение на горизонтальной поверхности, Вт*ч/м² | Суммарный поток излучения, Вт*ч/м² | Температура, ºС |
| Январь | 1052 | 686 | 1690 | 3,4 |
| Февраль | 1627 | 1090 | 2280 | 3,9 |
| Март | 2514 | 1503 | 2980 | 7,1 |
| Апрель | 4335 | 2080 | 4450 | 12,7 |
| Май | 5259 | 2293 | 4720 | 15,0 |
| Июнь | 6229 | 2390 | 5250 | 20,0 |
| Июль | 5909 | 2053 | 5120 | 24,4 |
| Август | 5795 | 1858 | 5680 | 24,4 |
| Сентябрь | 4907 | 1459 | 5970 | 18,9 |
| Октябрь | 3219 | 1197 | 4980 | 15,7 |
| Ноябрь | 1575 | 929 | 2760 | 11,0 |
| Декабрь | 896 | 603 | 1510 | 6,8 |

***Таблица 5*** *Продолжительность солнечного сияния в Крыму (часы) [6]*

| Месяц | Города Крыма | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Евпатория | Севастополь | Симферополь | Ялта | Феодосия |
| Январь | 73 | 62 | 90 | 76 | 58 |
| Февраль | 78 | 75 | 96 | 83 | 72 |
| Март | 142 | 145 | 156 | 140 | 132 |
| Апрель | 215 | 202 | 203 | 187 | 195 |
| Май | 277 | 267 | 263 | 242 | 275 |
| Июнь | 317 | 316 | 284 | 288 | 305 |
| Июль | 365 | 356 | 328 | 328 | 344 |
| Август | 339 | 326 | 306 | 310 | 324 |
| Сентябрь | 272 | 254 | 241 | 241 | 249 |
| Октябрь | 197 | 177 | 183 | 179 | 173 |
| Ноябрь | 99 | 98 | 117 | 103 | 87 |
| Декабрь | 65 | 64 | 80 | 73 | 51 |
| Год | 2439 | 2342 | 2347 | 2250 | 2265 |

Среднегодовое количество суммарной солнечной энергии, поступающей на 1 м2 поверхности составляет 1400 кВт час/год полезно используется для горячего водоснабжения около

700 кВт.ч/м2 , при этом экономия условного топлива может достичь 120-150 кг у.т/м2

## Анализ результатов исследования

Крым относится к регионам, наименее обеспеченным собственными традиционными энергоресурсами. Дефицит всех видов энергоносителей превышает 70 %, производством собственной энергии полуостров обеспечен лишь на 7 %. Изменение топливно-энергетического баланса в направлении собственных энергоресурсов возможно не только за счет развития традиционной энергетики, повышения энергоэффективности производства и внедрения ресурсо- и энергосберегающих мероприятий, но и при эффективном использовании альтернативных источников энергии, в первую очередь - солнечной энергии, как наиболее доступной.

Традиционная энергетика по средним экономическим показателям, без учета экологического фактора, в целом, пока что имеет перевес над альтернативной. Тем не менее, для солнечной энергии уже появляется все больше форм эффективного использования. Анализ показывает, что даже в благоприятных с точки зрения обеспечения энергией районах есть зоны, где альтернативная энергетика может обеспечивать значительную часть потребностей и быть социально перспективной (Таблица 2).

Для дальнейшего и более динамичного использования установок с использованием этого природного источника в Крыму имеются соответствующие предпосылки: достаточный для практического использования потенциал солнечной энергии и значительное количество возможных потребителей, развитая промышленная база и свободные производственные мощности, высококвалифицированные научно-технические кадры, наличие организаций, занимающихся проблемами альтернативной энергетики, имеющих большой опыт и заинтересованных в ее широком внедрении.

Достижение поставленной цели будет обеспечено путем разработки, организации производства и внедрения систем горячего водоснабжения, систем теплоснабжения и комплексных систем тепло- и электрообеспечения малой, средней и большой мощности для индивидуальных и коллективных потребителей на основе энергии солнца с использованием гелиоколлекторов, тепловых аккумуляторов, тепловых насосов, высокоэффективных фотопреобразователей и концентраторов солнечного излучения.

В результате выполнения программ предусматривается создать:

- эффективные преобразователи солнечной энергии в тепловую с коэффициентом полезного действия не менее 60...70 % и двумя уровнями нагревания – 50...70 ºС для систем горячего водоснабжения и отопления и 100... 300 ºС – для технологических потребностей;
- эффективные аккумуляторы тепла для его круглогодичного потребления, в т.ч. высокотемпературные с использованием фазового перехода «плавление-затвердевание», а также эффективные теплонасосные установки;
- солнечные и солнечно-ветровые электростанции и теплоэлектростанции малой, средней и большой мощности, в том числе, с использованием концентраторов солнечной энергии и фотоэлектрических преобразователей, с размещением теплоэлектрогенераторов на поверхности естественных или искусственных водохранилищ с внедрением последних в качестве гидроаккумуляторов и тепловых аккумуляторов.

Эксплуатация этих и аналогичных разработок позволит уменьшить потребность в топливе индивидуальных систем горячего водоснабжения и отопления на 25...30 %, создать автономную систему электроснабжения мощностью 5...10 кВт, а также мощные теплоэлектростанции водного базирования, которые будут обеспечивать в летний период получение электроэнергии до 200... 300 кВт и тепловой энергии свыше 1000 кВт с одного гектара занимаемой площади водоема. Размещение теплоэлектрогенерирующих модулей на поверхности водохранилищ исключает применение металлоконструкций и отчуждение земель под солнечные и ветровые электростанции, упрощает проблему применения концентраторов солнечной энергии и их ориентацию на Солнце.

При широкомасштабном внедрении солнечных установок различных типов возможно обеспечение до 15...20 % общего энергопотребления коммунального сектора в южных регионах России Крым как наиболее перспективный район для реализации вышеуказанных направлений обладает наиболее высоким энергетическим потенциалом солнечной энергии (Таблицы 4, 5). По расчетам специалистов рекомендуемый объем его использования в год – это около 75 тыс. т у.т., который наиболее эффективно можно использовать с апреля по октябрь.

Изложенный выше материал – сбор и ана-

лиз-обобщение фактического состояния практического внедрения в Крыму гелиосистем и формирование условий создания зоны приоритетного развития ВИЭ.

Данные, изложенные в Таблицах 4, 5 однозначно определяют благоприятные природные показатели для создания установок с использованием гелиоколлекторов. Среднесуточная энергетическая экспозиция суммарного излучения на облицованную поверхность при угле наклона $45^0$ для Крыма характеризует возможности круглогодичной эксплуатации двухконтурных систем горячего водоснабжения, повышая эффективность использования при наличии теплоносителя: вода/антифриз.

## Выводы

Данные обобщающие выводы показывают, что в Крыму создана база для реализации механизма экономического стимулирования развития ВИЭ, в том числе солнечной энергии. Для достижения существенных результатов необходима разработка соответствующих законодательных актов, которые позволят создать цивилизованный единый экономический механизм заинтересованности, как у производителей, так и потребителей гелиосистем.

Внедрение солнечных установок для энергопотребления в Республике Крым и городе Севастополь способствует не только значительному сокращению органических энергоресурсов и снижению выбросов вредных веществ, но и позволяет значительно поднять научно-производственный потенциал предприятий в инновационных областях, связанных с возобновляемой энергетикой.

Использование новых типов солнечных установок для преобразования потока солнечной радиации позволяет значительно увеличить их эффективность.

## Список литературы


1. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения
2. МИ 2440-97 ГСИ. Методы экспериментального определения и контроля характеристик погрешности измерительных каналов измерительных систем и измерительных комплексов (взамен МИ 2313-94)
3. МИ 2337-95 ГСИ. Счетчики электрические активной и реактивной энергии индукционные со встроенными устройствами формирования импульсов. Методика поверки
4. МИ 1991-89 ГСИ. Преобразователи электрических величин измерительные. Шунты постоянного тока измерительные. Методика поверки МИ 2158-91 ГСИ. Счетчики электрической энергии переменного тока электронные. Методика поверки
5. РМ-2696-01 Временная инструкция по расчету электрических нагрузок жилых зданий (взамен РМ-2696 1999г.)
6. РМ-2559 Инструкция по проектированию учета электропотребления в жилых и общественных зданиях
7. РМ-2559 Инструкция по проектированию учета электропотребления в жилых и общественных зданиях.
8. Бутырин, П.А. Упрощенные математические модели трехфазных трансформаторов для целей диагностики [Текст] / П.А. Бутырин, Т.А. Васьковская, М.Е. Алпатов // Электро. – 2002. – № 1. – С. 17-20.
9. Вержбицкий В.М. Численные методы: Математический анализ и обыкновенные дифференциальные уравнения. - Изд.: «Оникс 21 век», 2005.
10. А.В. Суворин: Электрические схемы элект роустановок: составление и монтаж. Практическое пособие электрикам// Феникс, 2014 г.
11. А. Анищенко В. Б. Козловская Методы и средства управления энергоснабжением и потреблением электроэнергии - Санкт-Петербург: Энергия, 2015г.


## References


1. GOST 32144-2013 Electrical energy. The compatibility of technical means is electromagnetic. Electricity quality standards in general-purpose power supply systems
2. MI 2440-97 GSI. Methods for the experimental determination and control of the characteristics of the error of measuring channels of measuring systems and measuring complexes (instead of MI 2313-94)
3. MI 2337-95 GSI. Induction electric meters for active and reactive energy with built-in pulse shaping devices. Verification method
4. MI 1991-89 GSI. Measuring converters of electrical quantities. Measuring DC shunts. Verification method MI 2158-91 GSI. Electricity meters of alternating current electronic. Verification method
5. RM-2696-01 Temporary instruction on the calculation of electrical loads of residential buildings (instead of RM-2696 1999)
6. RM-2559 Instructions for the design of electricity consumption metering in residential and public buildings
7. RM-2559 Instructions for the design of electricity consumption metering in residential and public buildings
8. Butyrin, P.A. Simplified mathematical models of

three-phase transformers for diagnostic purposes [Text] / P.A. Butyrin, T.A. Vaskovskaya, M.E. Alpatov // Electro. - 2002. - No. 1. - S. 17-20.
9. Verzhbitsky V.M. Numerical Methods: Mathematical Analysis and Ordinary Differential Equations. - Publisher: "Onyx 21st century", 2005.
10. A.V. Suvorin: Wiring diagrams of electrical installations: drawing up and installation. Practical guide to electricians // Phoenix, 2014.
11. A. Anischenko VB Kozlovskaya Methods and means of control of energy supply and consumption of electricity - St. Petersburg: Energy, 2015.

УДК 620.92

# Возможности модернизации фотоэлектрических электростанций

Муровский С.П.[1], Гусева Е.В.[2], Лепеха О.Г.[2], Тиман Д.И.[3]
[1]*Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Российская Федерация,*
murovski@inbox.ru
[2]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, alenaalena73@mail.ru, megadaniil2018@mail.ru*

Статья поступила 21.01.2022 г. ; после доработки 24.01.2022 г.

***Аннотация***

*В работе рассматриваются перспективные направления модернизации солнечных электростанций Республики Крым, подключенных в общую энергосистему. Проведен расчет по увеличению выработки солнечной электростанцией за счет изменения конфигурации и положения фотобатарей. Разработаны схемы электрических цепей энергоблоков с применением накопителей энергии. Рассчитаны параметры аккумуляторов и схемы их включения в состав энергоблоков.*

*Ключевые слова:* солнечная электростанция, модернизация, энергоблок, накопитель энергии, внутренние сети, Республика Крым

# Opportunities for modernization of photoelectric power plants

Murovskiy S.P[1]., Guseva E.V.[2], Lepekha O. G.[2], TimanD.I.[2]
[1]*V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Simferopol, Russian Federation,*
*Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,*
*alenaalena73@mail.ru, megadaniil2018@mail.ru*

Received 21.01.2022 y. .; received in final form 24.01.2022 y.

***Abstract***

*The paper discusses promising areas of modernization of solar power plants of the Republic of Crimea, connected to the General power system. The calculation of the increase in the production of solar power by changing the configuration and position of photovoltaic cells. Schemes of electric circuits of power units with the use of energy storage devices have been developed. Parameters of accumulators and schemes of their inclusion in structure of power units are calculated.*

*Keywords:* solar power plant, modernization, power unit, energy storage, internal networks, Republic of Crimea

## Введение

Общемировой спрос на энергию, согласно оценкам Международного Энергетического Агентства (МЭА) [1, 2], вырастет к 2040 г на 37%. Доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в производстве электроэнергии за приведенный период больше всего вырастет в развитых странах мира, достигнув 37%.

Неуклонный рост использования ВИЭ во многих странах к 2040 г повысит их долю в мировом производстве электроэнергии до 30 – 33 % от всей генерации.

В странах Европейского Союза использование энергии ветра достигнет 20% от общего производства электроэнергии, в то время как в Японии использование солнечной энергии в летний период составит 37% от пикового спроса.

Согласно прогнозам, солнечная фотоэлектрическая энергетика (включая затраты на соответствующие накопители энергии (НЭ) может производить 23% мировой электроэнергии к 2040 г и 29% к 2050 г, полностью заменив угольную генерацию и оставив природный газ всего

лишь с однопроцентной долей в мировой электроэнергетике [1, 2].

Рост использования ВИЭ частично вызван значительным падением цен на оборудование для солнечных (СЭС) и ветровых (ВЭС) электростанций. Стоимость установки ВЭС с 2010 по 2015 годы упала на 30%, а стоимость мощных СЭС - в три раза. В результате СЭС и ВЭС составляют основную часть генерирующих источников в электроэнергетике ВИЭ. ВЭС и СЭС входят в объединенную единую энергосистему (ЭС) наряду с традиционными тепловыми электростанциями (ТЭС, АЭС) и ГЭС большой мощности.

## Направления развития электростанций на базе ВИЭ

Можно выделить четыре стадии распространения электростанций с ВИЭ в зависимости от соотношения мощности электростанций с ВИЭ и невозобновляемых источников (НИЭ), каждая из которых имеет свои специфические характеристики. Для каждой стадии даются соответствующие рекомендации для проектирования, модернизации и эксплуатации ВЭС и СЭС.

На первом этапе интеграции генерация источников энергии с ВИЭ не оказывает заметного влияния на сеть, примерно 3% в годовом производстве электроэнергии, а основную часть составляют электростанции с НИЭ, такие как ТЭС, АЭС, мощные ГЭС. Нестабильная генерация ВЭС и СЭС «классифицируется» здесь просто как ежедневные и «естественные» изменения спроса на электроэнергию. К странам, которые в настоящее время находятся на этом этапе, относятся Индонезия, Южная Африка, Мексика.

На второй стадии интеграции генерация источников энергии с ВИЭ уже начинают серьезно влиять на систему, доля ВИЭ в годовой генерации составляет от 3% до 15%, но такое влияние регулируется относительно просто путем усовершенствования некоторых практических методов управления электроэнергетическим сетевым хозяйством, например, с помощью умного прогнозирования выработки ВЭС и СЭС. На данной стадии находятся Чили, Китай, Бразилия, Индия, Новая Зеландия, Австралия, Нидерланды, Швеция, Австрия, Бельгию.

На третьем этапе доля электростанций с ВИЭ составляет от 15% до 25%, при этом возникают существенные вызовы для энергосистемы в плане интеграции нестабильных ВИЭ. Их влияние ощущается как на уровне системы в целом, так и на практике работы электростанций с НИЭ, в перовую очередь, ТЭС. Здесь на первое место выходит гибкость энергосистемы – её способность реагировать на неопределенность и изменчивость баланса спроса и предложения. Два главных гибких ресурса этой стадии: управляемые (маневренные) электростанции и сеть, но уже начинает повышаться значение управления спросом и новых технологий накопления энергии. На нынешний день на данном этапе находятся Италия, Великобритания, Греция, Испания, Португалия и Германия.

На четвертой стадии с долей нестабильной генерации ВИЭ в 25 - 50% годовой выработки и с её кратковременными повышениями до 100% суточного потребления вызовы носят высокотехнологический характер. На четвертой стадии требуется еще большая гибкость системы, её способность к самовосстановлению после резких и объемных колебаний выработки энергии. На этой стадии развития ЭС находятся Ирландия и Дания. На этой стадии требуется применение НЭ, в частности, химических аккумуляторов.

В последние 5 лет во внутренней сети СЭС широко применяются различные накопители энергии. Увеличение мощности ВИЭ, в частности, расширяющееся применение СЭС в электроэнергетических системах (ЭЭС) во всем мире, планы предстоящего роста мощности СЭС в предстоящие 10 - 20 лет привело к значительному производству мощных НЭ.

Случайный характер солнечного излучения (СИ) и трудность устойчивого прогнозирования и устойчивого обеспечения производства электроэнергии СЭС, значительные суточные, квартальные и годовые колебания интенсивности СИ, зависимость выработки электроэнергии от метеоусловий на площадке СЭС, непредсказуемость текущей выработки электроэнергии и невозможность ее точного планирования на требуемый срок по условиям выполнения СГПН приводят к реально невозможной эксплуатации СЭС без НЭ, обеспечивающих выработку электроэнергии хотя бы на период от 2 до 6 часов [3, 4].

Для примера на рис. 1 приведено фото СЭС на острове Кауаи (Kauai) Гавайского архипелага с блоками НЭ общей емкостью 52 МВт·ч [4].

НЭ выполняют ряд функций: выравнивание графиков нагрузки в ЭС (накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной энергии и выдачу в сеть в периоды дефицита);

- обеспечение бесперебойного питания особо важных объектов, собственных нужд электростанций и подстанций;
- демпфирование колебаний мощности, ста-

билизация работы малоинерционных децентрализованных источников электрической энергии;
- обеспечение бесперебойной выработки электроэнергии ВЭС и СЭС.



**Рис. 1.** Внешний вид СЭС на острове Кауаи (Kauai) Гавайского архипелага
На переднем плане - блоки НЭ общей ёмкостью 52 МВт·ч

В связи с развитием СЭС в Республике Крым (РК), ЭС в РК можно отнести к третьей стадии интеграции источников энергии с ВИЭ. В таблице 1 приведён перечень генерирующих мощностей в схеме электроснабжения РК и приведено соотношение установленной мощности электростанций с ВИЭ по отношению к общей установленной мощности электростанций.

***Таблица 1.*** *Величины генерирующих мощностей в схеме электроснабжения Республики Крым*

| № п/п | Наименование электростанции | Установленная мощность, МВт |
|---|---|---|
| 1 | Таврическая (Симферопольская) ПГУ-ТЭС | 470 |
| 2 | Балаклавская (Севастопольская) ПГУ-ТЭС | 470 |
| 3 | Симферопольская ТЭЦ | 100 |
| 4 | Севастопольская ТЭЦ | 33 |
| 5 | Мобильные ГТЭЦ | 22x10 |
| 6 | Сакская ТЭЦ | 120 |
| 7 | Камыш-Бурунская ТЭЦ | 30 |
| Итого традиционных электростанций | | 1443 |
| 1 | Тарханкутская ВЭС | 15,9 |
| 2 | Сакская ВЭС | 19 |
| 3 | Останинская ВЭС | 25 |
| 4 | Донузлавская ВЭС | 10,9 |
| 5 | Судакская ВЭС | 6,3 |
| 6 | Пресноводненская ВЭС | 6 |
| 7 | Восточно-Крымская ВЭС | 2,8 |
| Итого ветровых электростанций | | 85,9 |
| 1 | Перовская СЭС | 105,56 |
| 2 | Охотниковская СЭС | 82,65 |
| 3 | Николаевская СЭС | 69,7 |
| 4 | Митяевская СЭС | 31,55 |
| 5 | Родниковая СЭС | 7,5 |
| Итого солнечных электростанций | | 296,96 |
| Итого электростанций с ВИЭ | | 382,86 |
| Итого всех электростанций | | 1825,86 |
| Процент электростанций с ВИЭ | | 21% |

## Цель и постановка задач

Целью работы является определение перспективных направлений модернизации действующих солнечных электростанций на территории Республики Крым и повышение надежности поставки электроэнергии в единую систему электроснабжения полуострова.

СЭС в РК проектировались и сооружались в начале 2001-2005 гг. и эксплуатируются уже свыше 10 лет. В настоящее время актуальными задачами являются как проектирование и сооружение новых СЭС, так и модернизация существующих.

Чтобы представить возможности модернизации СЭС с точки зрения увеличения их установленной мощности, выработки общего объема электроэнергии, повышения стабильности выработки, повышения удельных показателей (кВт/км2) при размещении оборудования на площадке СЭС и т.п., необходимо рассмотреть расчетные соотношения параметров СЭС.

Мощность СЭС определяется вероятностными характеристиками первичного энергоносителя – солнечного излучения и имеет ряд особенностей.

Установленная электрическая мощность, как СЭС, так и отдельных энергоблоков (ЭБ) с фотопанелями (ФЭП), меньше в десятки раз по сравнению с ЭБ традиционных тепловых электростанций с гарантированной мощностью. ЭБ занимают обширные территории под открытым небом, не имеют ограждения. СИ характеризуется значительными суточными, квартальными и годовыми колебания интенсивности.

## Задачи модернизации оборудования и схем внутренних сетей СЭС

Значительные отличия от традиционных электростанций имеет внутренняя электрическая схема трехфазных сетей СЭС. В составе СЭС имеются силовые электрические сети постоянного тока ФЭП и трехфазные сети переменного тока для передачи в энергосистему мощности отдельных ЭБ.

Номинальное линейное напряжение ЭБ имеет относительно низкую величину – 1,0 кВ. Поэтому схема объединения мощности СЭС для выдачи в существующую традиционную высоковольтную сеть выполняется двухуровневой или трехуровневой, с несколькими ступенями трансформации. На территории СЭС не используются воздушные линии электропередачи. Все внутренние сети СЭС выполняются кабельными линиями.

При выборе направления модернизации оборудования и схемы внутренней сети СЭС необходимо оценить факторы влияющие:

- на фактическую мощность, $P_{ФАК}$ СЭС и реальную выработку электроэнергии, $W_{РЕАЛ}$;
- на удельный показатель, кВт/км$^2$ при размещении площадки СЭС;
- на стоимость и окупаемость СЭС.

В работе рассмотрено три варианта мощности ФБ - 150 Вт, 200 Вт; 250 Вт и сделана оценка влияния на $P_{ФАК}$ СЭС и $W_{РЕАЛ}$. Рассмотрена различная компоновки ФЭП по количеству и размещению ФБ (рассмотрено два варианта – 16 и 20 ФБ в составе ФЭП).

Проведена оценка параметров в зависимости от различных углов наклона ФЭП, β при размещении на площадке СЭС, рассмотрены несколько вариантов угла наклона установки ФЭП, β по отношению к широте местности, φ площадки СЭС. Определены расстояния между панелями ФЭП на площадке СЭС и степень их взаимного затенения, α (рассмотрено два варианта размещения).

В ходе модернизации оборудования СЭС изменение углов наклона ФЭП, β при размещении на площадке СЭС представляет наиболее простую и при этом весьма эффективную задачу увеличения фактической мощности $P_{ФАК}$ СЭС и реальной выработки электроэнергии $W_{РЕАЛ}$.

При проектировании СЭС среднесуточная мощность результирующего СИ на наклонной поверхности ФЭП $\overline{E}_{H\,ji}$ (Вт/м$^2$) для ФЭП по кварталам года рассчитывается на основе среднесуточной удельной мощности, $E_i$ (Вт/м$^2$) за квартал по данным метеонаблюдений [5]:

- широта местности φ;
- данные метеонаблюдений по интенсивности суммарного среднесуточного СИ на горизонтальную поверхность, $E_i$ (Вт/м$^2$);
- среднее количество ясных солнечных дней в году, $\overline{d}_{ji}$;
- среднее число часов СИ, $\overline{h}_{ji}$ для заданной широты местности, φ;
- характеристики установки ФЭП – азимут, $A_K$ и угол наклона, $\beta$ ФЭП к горизонтальной поверхности, коэффициент затенения, $\alpha$.

Результатом расчета по принятым исходным данным являются значения $\overline{E}_{H\,ji}$ на наклонной поверхности ФЭП. Значения среднесуточной мощности результирующего солнечного излучения $\overline{E}_{ji}$ для каждого квартала определяются по формуле (1):

$$\overline{E}_{ji} = \frac{\sum_{i=1}^{3} E_i}{3}, \qquad (1)$$

где: $i$ - порядковый номер месяца; j = 1, 2, 3, 4 - порядковый номер квартала.

Значения $\overline{E}_{H\,ji}$ определяются по формулам (2, 3):

$$\overline{E}_{H\,ji} = R \cdot K_A \cdot \overline{E}_{ji}, \qquad (2)$$

$$R = (1-\varepsilon)\cdot R_b + \varepsilon \cdot [\frac{1+\cos\beta}{2}] + \rho \cdot [\frac{1-\cos\beta}{2}], \qquad (3)$$

где: R – коэффициент, учитывающий изменение $\overline{E}_{ji}$ на наклонной поверхности;

$K_A$ – коэффициент, зависящий от азимута $A_K$, (при $A_K = 0$, $K_A = 1$; при $A_K = \pm 10^0$, $K_A = 0{,}99$; при $A_K = \pm 15^0$, $K_A = 0{,}98$);

$\varepsilon$ – отношение рассеянного СИ к суммарному;

$\rho$ – отражательная способность земли для СИ;

$R_b$ – коэффициент, характеризующий в среднем пропускающую способность атмосферы;

$\beta$ – угол наклона ФЭП к площади площадки.

Если принять значение $\overline{E}_{ji}$ для горизонтальной поверхности (β = 0) за единицу, то при β = φ значения $\overline{E}_{H\,ji}$ составят 1,21, при β = ( φ – δ) , где δ - средний угол склонения, значения $\overline{E}_{H\,ji}$ составят 1,27, при точной ориентации поверхности ФЭП перпендикулярно потоку СИ значения

$\overline{E}_{H\,ji}$ составят 1,56. Увеличение $\overline{E}_{H\,ji}$ при изменении угла наклона β столь значительно, что в конструкции ФЭП некоторых СЭС предусматриваются устройства регулирования угла поворота ФЭП с целью слежения за солнцем (рис. 2).



**Рис. 2** . Фото панелей в составе СЭС «Star», США, 2015 г, мощностью 579 МВт (на 20% ФЭП предусмотрены устройства регулирования угла поворота с целью слежения за солнцем)

Значения $\overline{E}_{H\,ji}$ определяют в дальнейшем при проектировании СЭС мощностную характеристику ФБ $P_{j\,ФБ} = f(\overline{E}_{H\,ji})$, фактическую мощность $P_{ФАК}$ и реальную выработку электроэнергии $W_{РЕАЛ}$ СЭС.

Следующим этапом модернизация СЭС может выполняться путем замены ФБ в составе ФЭП в связи улучшением их характеристик (мощности, КПД, массо-габаритных параметров) по сравнению с исходными, принятыми ранее. Для определения характеристик ФБ на площадке части СЭС необходимы паспортные данные ФБ и значения среднесуточной мощности результирующего СИ $\overline{E}_{H\,ji}$ на наклонной поверхности. Нормированные параметры ФБ указываются при следующих условиях: атмосферное давление 1 атм, температура окружающей среды $25^0$С, интенсивность суммарного СИ $E_{i0}$ = 1000 Вт/м$^2$ или 800 Вт/м$^2$. Электрические параметры ФБ приводятся в соответствии с типовой вольтамперной характеристикой (ВАХ) (рис. 3).

Рассмотрено три варианта мощности ФБ - 150 Вт, 200 Вт; 250 Вт с разными значениями параметров и выявлено влияние параметров ФБ на фактическую мощность $P_{ФАК}$ и реальную выработку электроэнергии $W_{РЕАЛ}$ для оценки возможности модернизации СЭС. Полученные значения приведены в таблице 2.

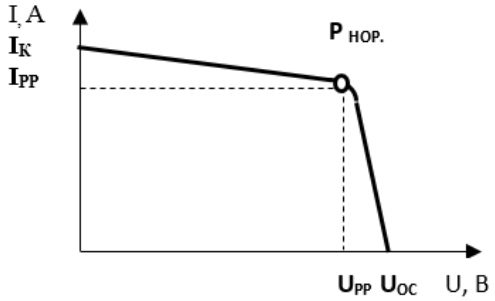



**Рис. 3.** Типовая ВАХ солнечной батареи: Р НОР. – максимальная нормированная мощность, Вт; UPP – напряжение в точке максимальной мощности, В; IPP – сила тока в точке максимальной мощности, А; UOC – напряжение холостого хода при включении, В; IК – ток короткого замыкания, А

***Таблица 2.*** *Параметры фотосолнечных батарей и энергоблоков [5]*

| № п/п | Параметры | ФБ1 | ФБ2 | ФБ3 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | Интенсивность суммарного СИ, Е, Вт/м$^2$ | 1000 | | |
| 2 | $P_{НОР}$, Вт | 150 | 200 | 250 |
| 3 | $U_{РР}$, В | 18 | 37,2 | 30,0 |
| 4 | $I_{РР}$, А | 8,29 | 5,38 | 8,33 |
| 6 | $I_К$, А | 8,75 | 5,82 | 8,89 |
| 7 | η, % | 17,46 | 18,1 | 17,5 |
| 8 | Размер (Д х Ш х Г), мм | 1480 х 680 х 30 | 1580 х 808 х 35 | 1640 х 992 х 40 |
| 9 | Масса, кг | 12,5 | 15 | 18 |
| 10 | Реализуемая мощность ФЭП, $P_{ФБ}$, Вт | 35,2-112,0 | 47,0-149,2 | 51,0-186,5 |
| 12 | Число ФБ в ФЭП | 16 | | |
| 13 | Напряжение ФЭП $U_П$, В | 72 | 148 | 120 |

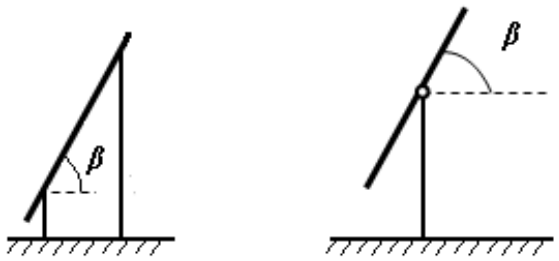
| № п/п | Параметры | ФБ1 | ФБ2 | ФБ3 |
|---|---|---|---|---|
| 14 | Сила тока ФЭП $I_П$, А | 33,16 | 21,52 | 33,32 |
| 15 | Мощность ФЭП $Р_П$, Вт | 2400 | 3200 | 4000 |
| 16 | Размеры ФЭП (Д х Ш), м | 6,5 х 3,0 | 6,9 х 3,5 | 7,2 х 4,4 |
| 17 | Масса ФЭП, кг | 220 | 264 | 316,8 |
| 18 | КИУМ по месяцам | 0,02-0,224 | 0,026-0,225 | 0,026-0,225 |
| 19 | КИУМ в среднем за год | 0,123 | 0,15 | 0,15 |

Как следует из анализа параметров ФБ и ФЭП (таблица 2) при увеличении нормируемой мощности ФБ в 1,33 раза, реализуемая мощность ФБ в рассматриваемых условиях размещения СЭС ($\varphi = 45^0$с.ш., при $\beta = \varphi$) и выработка энергии ФЭП за год - возрастают в таком же соотношении, а КИУМ увеличивается 1,2. Аналогично, при увеличении нормируемой мощности ФБ в 1,67 раза, реализуемая мощность ФБ и выработка энергии ФЭП за год - возрастают в таком же соотношении, а КИУМ практически не меняется.

Увеличение площади панели ФЭП составляет, при замене тех же ФБ, соответственно - 1,24 и 1,64. Увеличение площади СЭС составляет - 1,06 и 1,11. Преимущество получается по удельному показателю (кВт/км$^2$) – соответственно - 1,17 и 1,48.

Очевидно, что увеличение выработки электроэнергии СЭС почти в 1,7 раза может быть эффективно, но для оценки модернизации ФБ в существующей СЭС требуется технико-экономический анализ. При проектировании новых СЭС применению более мощных ФБ следует отдавать предпочтение.

Следующим направлением модернизации СЭС может стать изменение удельного показателя (кВт/км$^2$) за счет изменения расстояний между панелями ФЭП на площадке СЭС и соответственно, степени их взаимного затенения $\alpha$. Применяется два основных варианта размещения платформы ФЭП на поверхности земли (рис. 4): платформа имеет четыре точки опоры и устанавливается неподвижно на относительно небольшой высоте Н (до 0,5 м) относительно земли (рис. 4, а) и платформа устанавливается на одной стойке высотой до 2,5 м с возможностью, в общем случае, регулировать угол наклона $\beta$ (рис. 4, б).




а). б).

**Рис. 4.** Примеры установки платформы ФЭП с СБ на поверхности земли

Обычно в составе ФЭП объединяется 16-20 СБ для удобства монтажа и установки платформ ФЭП на площадке части СЭС, а также для получения необходимых выходных параметров: тока и напряжения ФЭП.

Порядок и схема расчета степени затенения $\alpha$ поясняются рис. 5. Штриховой линией на рис. 5 показано размещение ФЭП с затенением, на расстоянии $L_2$ меньше $L_1$ (где $L_1$ – размещение ФЭП без затенения).

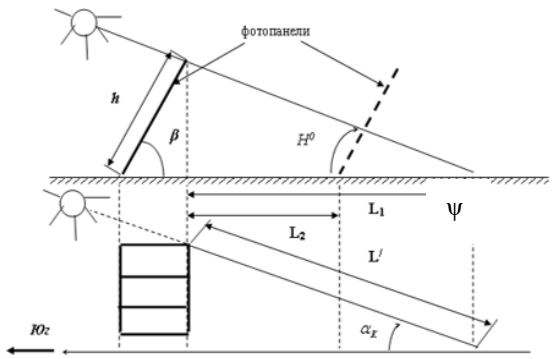



**Рис. 5.** Схема расположения ФЭП для расчета степени затенения $\alpha$ :
вверху - вид сбоку; внизу – вид сверху

Анализируя мощность СИ, можно оценить длину тени L (рис. 5) для четырех характерных точек– летнего (зимнего) солнцестояния и весеннего (осеннего) равноденствия. Максимальная величина затенения соответствует утренним часам в день зимнего солнцестояния, минимальное затенение – полдню в день летнего солнцестояния.

Модернизация СЭС может выполняться путем включения накопителей энергии в составе

ЭБ. Схема ЭБ СЭС содержит цепь преобразования напряжения постоянного тока ФБ в стандартный вид для ЭС по числу фаз, частоте тока и величине напряжения. Для этой цели в ЭБ применяется трехфазный мостовой инвертор с выходным разделительным ТР, вторичное (выходное для сети) напряжение которого $U_{Л2}$ должно соответствовать стандартной величине линейного напряжения внутренней сети СЭС [6, 7].

Главным элементом цепи преобразования является трехфазный мостовой полупроводниковый преобразователь (ПП), который, в зависимости от угла управляющего сигнала может работать как в режиме управляемого выпрямителя (УВ), так и в режиме трехфазного инвертора (И) - рис. 6.

Параметры УВ и И можно регулировать в широком диапазоне при изменении угла управления α для УВ и угла управления β для И. Для УВ угол управления α отсчитывается вправо от точки естественной коммутации, для И угол управления β отсчитывается влево от точки естественной коммутации – рис. 6.

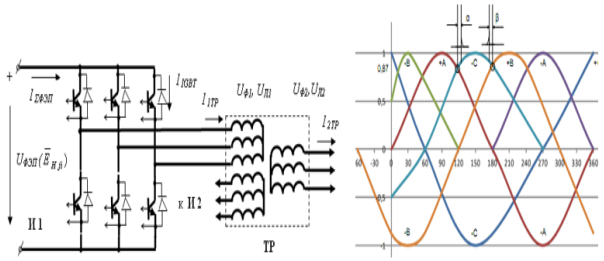



**Рис. 6.** Схема полупроводникового преобразователя и схема отсчета углов управления α управляемого выпрямителя и β инвертора в составе трехфазного полупроводникового преобразователя

Расчет параметров НЭ в составе внутренней цепи ЭБ СЭС по предложенным далее схемам включения АК на заряд и разряд (рис. 7, 8) выполнен для мощности ЭБ - Р = 2,0 МВт. Рассматриваются варианты включения АК и режимы заряда – разряда АК применительно к электрической цепи одного ЭБ, так как вся внутренняя схема СЭС состоит из однотипных ЭБ. Электрическая схема ЭБ с АК в режиме зарядки АК в ночное время при избытке энергии в сети приведена на рис. 7 [8, 9].

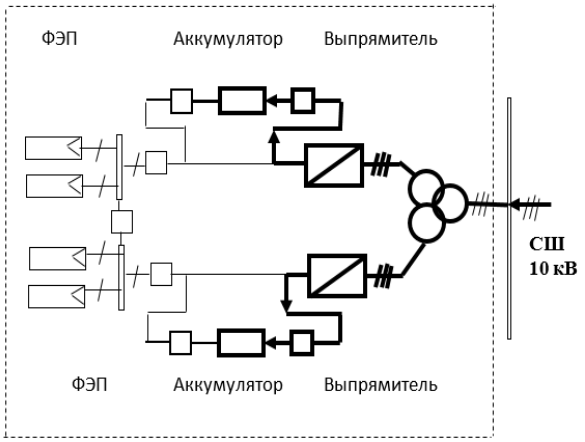



**Рис. 7** Схема блока ЭБ с подключением АК. Жирным контуром обозначены цепи в режиме заряда АК от сети 10 кВ в ночное время

При разряде АК параллельно с ФЭП (рис. 8) поддерживается надежная работа СЭС в дневное время при колебаниях СИ. В часы вечернего максимума нагрузки запасенная в АК энергия обеспечивает работу СЭС при отсутствии СИ.

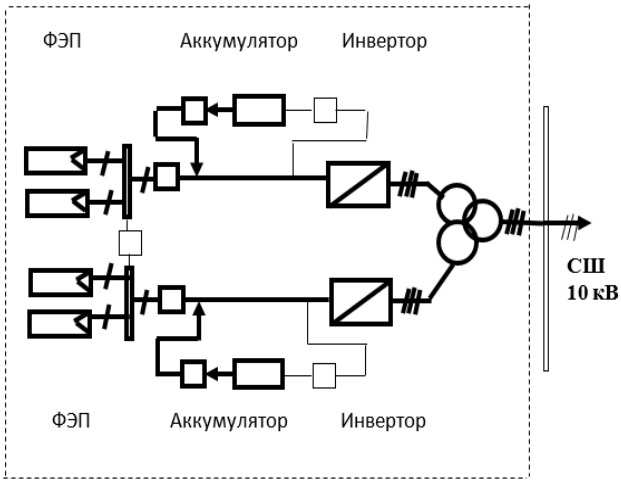



**Рис. 8.** Схема ЭБ с подключением АК. Жирным контуром обозначены цепи в стандартном режиме работы инверторов от ФЭП при наличии СИ и подключении АК на разряд

Для расчета накопителей выбираем литий-ионные АК как наиболее эффективные аккумуляторы на сегодняшний день, с техническими характеристиками, представленными в таблице 3 [10].

***Таблица 3***. *Технические характеристики литий-ионных АК*

| Параметры | Значения | Характеристика |
|---|---|---|
| Мощность | 1,86 МВт·ч | Накопитель большой емкости «под ключ» для систем резервного электропитания, ветро- и солнечной энергетики, магистральных электросетей |
| | 1,11 МВт·ч | |
| Номинальное напряжение | 620 В | |
| Диапазон напряжения | 505 – 705 В | |
| Мощность | 1,6 МВт·ч | 1600 KWH ENERGY STORAGE Система накопления энергии на базе литий-ионных батарей Винстон для резервного питания крупных объектов |
| | 0,6 МВт·ч | 600 KWH ENERGY STORAGE Система накопления энергии на базе литий-ионных батарей Винстон для резервного питания крупных объектов |
| Номинальное напряжение | 620 В | |
| Диапазон напряжения | 505 –705 В | |
| Рабочая температура | От $-25^0$C до + $60^0$C | |

Выпрямленное напряжение на выходе УВ в схемах заряда АК в обоих ЭБ (рис. 7, 8) принимается неизменным и равным значению $U_В$. Необходимо учесть, что разряд элементов АК не должен превышать 80%, поэтому необходимо задать значение глубины разряда батареи $\beta = 0{,}8$. Также на параметры АК влияет температура окружающей среды. При понижении температуры емкость батареи снижается. Поэтому введен коэффициент α, учитывающий уменьшение емкости при понижении температуры окружающей среды. При средней температуре внутри помещения шкафа ЭБ, где предполагается установить АК, равной 10˚С, коэффициент α примем равным 0,95.

При расчете количества АК в составе НЭ для примера примем среднее значение времени разряда АК – 4 часа. Для достижения необходимого заряда необходимо соединить параллельно выбранные из таблицы 3 типы АК. Результаты расчета представлены в таблице 4.

***Таблица 4.*** *Параметры АК в составе накопителей энергии*

| Блок | Количество НЭ | Параметры | Значения |
|---|---|---|---|
| ЭБ СЭС | 2 | $Q_{ПОТР} = n\, I_В$ | 6660 А·ч |
| | | $q_0$ для АК НЭ 1,86 МВт | 3100 А·ч |
| | | $N_{ПАРАЛ.}$ АК | 2 |
| | | Всего АК в ЭБ | 4 |

По результатам расчета получаем 4 АК емкостью по 6660 А·ч каждый и номинальным напряжением 620 В.

## Выводы

В работе проведен анализ развития электростанций на базе СЭС и внедрения их в общую энергосистему. Рассмотрены перспективные направления модернизации солнечных электростанций Республики Крым. Общим при модернизации действующих СЭС можно выделить: увеличение мощности станций в целом, увеличение мощности единичных энергоблоков СЭС, применение накопителей энергии, в частности, литий-ионных аккумуляторов. Рассчитаны параметры и характеристики энергоблоков СЭС с учетом усовершенствования применяемого оборудования. Разработаны схемы электрических цепей энергоблоков с применением накопителей энергии. Рассчитаны параметры аккумуляторов и схемы их включения в составе энергоблоков.

## Список литературы

1. Электронный ресурс. Режим доступа: // http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy_ razvitiya_mirovoj_elektroenergetiki_1/ Перспективы развития мировой электроэнергетики до 2035 года.
2. Электронный ресурс. Режим доступа: // http:// uabio.org›img/files/docs/uabio-position-paper-13/ Анализ энергетических стратегий стран ЕС и мира.
3. Лесик В.П. Общая характеристика и параметры мощных солнечных электростанций/ В.П. Лесик, Л.Д. Сокут// Сборник статей по материалам научно-практической конференции с международным участием «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2017» (Севастополь, 08.2017г.) Под редакцией: Ю.А. Омельчук, Н.В. Ляминой, Г.В. Кучерик/ Севастополь: СевГУ, 2017. - С. 763-769.
4. Сокут Л.Д. Возможности повышения эффектив-

ности солнечных электростанций в объединенной электрической сети за счет применения накопителей энергии [Текст] / Л.Д. Сокут, А.С. Муровская, А.Н. Курзо // Сборник статей Международной научно-практической конференции «Внедрение результатов инновационных разработок: проблемы и перспективы» (Пермь, 08.02.2017 г.). - В 2 ч. Ч.1 / Уфа: Омега сайнс, 2017. - С.70-73.
5. Бекиров Э.А. Основные этапы расчета параметров солнечной электростанции / Э.А. Бекиров, Л.Д. Сокут // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология».- 2013.- № 17 (139).- С. 29-35.
6. Гельман М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр: ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
7. Сокут Л.Д. Моделирование универсального полупроводникового преобразователя в цепи электрических машин средней и большой мощности/ Л.Д. Сокут, С.П. Муровский, Н.М. Акулиничев// Строительство и техногенная безопасность.- 2018.- № 11 (63).- С. 129-135.
8. Сокут Л.Д. Перспективы развития систем электроснабжения за счет подключения ветровых и солнечных электростанций с накопителями энергии в общую энергосистему / Л.Д. Сокут, А.С. Муровская // Строительство и техногенная безопасность. - 2017.- № 7 (59). - С. 113-121.
9. Муровский С.П. Расчет параметров накопителей энергии для солнечных электростанций при включении их в объединенную энергосеть / С.П. Муровский, Л.Д. Сокут, В.П. Лесик // Журнал «Электрооборудование: эксплуатация и ремонт».- М.: Панорама.- 2017.- №12.- С.46-49.
10. Сокут Л.Д. Аккумулирование энергии для солнечной электростанции / Сокут Л.Д. // Инновации в сельском хозяйстве.- 2017.- № 1 (22).- С. 154-162.

## References

1. Electronic resource. Access mode: // http://www.ruscable.ru/article/Perspektivy_razvitiya_mirovoj_elektroenergetiki_1/ Prospects for the development of the world electric power industry until 2035.
2. Electronic resource. Access mode: // http:// uabio.org›img/files/docs/uabio-position-paper-13/ Analysis of energy strategies of the EU countries and the world.
3. Lesik V.P. General characteristics and parameters of powerful solar power plants / V.P. Lesik, L.D. Sokut // Collection of articles based on the materials of the scientific and practical conference with international participation "Environmental, industrial and energy security - 2017" (Sevastopol, 08.2017) Edited by: Yu.A. Omelchuk, N.V. Lyamina, G.V. Kucherik / Sevastopol: SevGU, 2017. - S. 763-769.
4. Sokut L.D. Opportunities to improve the efficiency of solar power plants in the integrated electrical grid through the use of energy storage devices [Text] / L.D. Sokut, A.S. Murovskaya, A.N. Kurzo // Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference "Implementation of the results of innovative developments: problems and prospects" (Perm, 08.02.2017). - At 2 p. Part 1 / Ufa: Omega Science, 2017. - P.70-73.
5. Bekirov E.A. The main stages of calculating the parameters of a solar power plant / E.A. Bekirov, L.D. Sokut // International scientific journal "Alternative energy and ecology". - 2013. - No. 17 (139). - P. 29-35.
6. Gelman M.V. Converting technique: textbook / M.V. Gelman, M.M. Dudkin, K A. Preobrazhensky. - Chelyabinsk: Publishing Center: SUSU, 2009. - 425 p.
7. Sokut L.D. Modeling of a universal semiconductor converter in the circuit of electrical machines of medium and high power / L.D. Sokut, S.P. Murovsky, N.M. Akulinichev// Construction and technogenic safety.- 2018.- No. 11 (63).- P. 129-135.
8. Sokut L.D. Prospects for the development of power supply systems by connecting wind and solar power plants with energy storage devices to a common energy system / L.D. Sokut, A.S. Murovskaya // Construction and technogenic safety. - 2017. - No. 7 (59). - S. 113-121.
9. Murovsky S.P. Calculation of the parameters of energy storage devices for solar power plants when they are included in the integrated power grid / S.P. Murovsky, L.D. Sokut, V.P. Lesik // Journal "Electrical Equipment: Operation and Repair" - M .: Panorama. - 2017. - No. 12. - P. 46-49.
10. Sokut L.D. Energy storage for a solar power plant / Sokut L.D. // Innovations in agriculture. - 2017. - No. 1 (22). - P. 154-162.

УДК 621.313.13

# Переходные процессы пуска асинхронного двигателя от электрической сети ограниченной мощности

А.К. Пронина[1], К. П. Путилин[2], С.А.Конева[3]
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, pronina-a@bk.ru, putilin-kp39@mail.ru, ksa2602@mail.ru*

Статья поступила 01.02.2022 г.; после доработки 03.02.2022 г.

***Аннотация***

*Предлагается методика расчета переходных процессов пуска асинхронного двигателя от сети соизмеримой мощности по математической модели с аппроксимацией характеристики момента двигателя квадратичной функцией скорости на интервале разгона двигателя от нулевой скорости до критической.*

*Ключевые слова:* асинхронный двигатель, характеристики двигателя, пуски двигателя от слабой сети, методика расчета переходного процесса пуска.

# Transient processes of starting an asynchronous motor from an electrical network of limited power

A. K. Pronina[1], K. P. Putilin[2], S.A.Koneva[3]
*Sevastopol State University, 33 Universitetskaua st., Sevastopol, 299053, Russia pronina-a@bk.ru, putilin-kp39@mail.ru, ksa2602@mail.ru*

Received 01.02.2022 y.; received in final form 03.02.2022 y.

***Annotation***

*A method is proposed for calculating the transient processes of starting an asynchronous motor from a network of comparable power according to a mathematical model with an approximation of the motor torque characteristic by a quadratic function of speed at the engine acceleration interval from zero speed to critical.*

*Keywords:* asynchronous motor, motor characteristics, engine starts from a weak network, method of calculating the transient start-up process

## Введение

Пуски асинхронных двигателей в электрических сетях ограниченной мощности часто сопровождаются значительным воздействием на сеть, вызывая в сети провалы напряжения, что в свою очередь приводит к снижению перегрузочной способности двигателей, затяжным разгонам, увеличенным пусковым потерям и перегреву изоляции обмоток машины. Представляет интерес оценка вышеперечисленных негативных последствий в работе асинхронных приводов со статическими моментами нагрузки, для приводов с частыми пусками и для электромеханизмов повторно-кратковременного режима работы.

Факторами, определяющими режим пуска двигателя, являются:

- мощность короткого замыкания сети;
- мощность и параметры двигателя, его характеристики тока и момента;
- зависимость момента сопротивления рабочего механизма от скорости, изменяющейся в процессе разгона;
- приведенный к валу двигателя момент инер-

ции вращающихся частей электромеханизма.

Переходный процесс разгона двигателя при пуске определяется нелинейным дифференциальным уравнением движения:

$$M(\Omega) - M_c(\Omega) = \mathcal{J}\frac{d\Omega}{dt} \qquad (1)$$

где $M(\Omega)$и $M_c(\Omega)$- зависимости момента двигателя и момента сопротивления механизма от скорости; $\mathcal{J}$- приведенный к валу двигателя момент инерции $\mathcal{J} = \mathcal{J}_{\text{дв}} + k\mathcal{J}_{\text{мех}}$; $t$- время.

Решение уравнения (1) дает зависимость $\Omega(t)$, из которой может быть получена и обратная ей функция $t(\Omega)$. Используя характеристику зависимости тока от скорости $I(\Omega)$, по известной зависимости скорости $\Omega(t)$ получаем функцию изменения тока во времени в виде $I[\Omega(t)] = I(t)$. Имея зависимость $I(t)$ далее определяем суммарные потери энергии на активном сопротивлении обмоток статора в виде интеграла

$$Q_{\text{п}} = 3r_1\int_0^{t_{\text{п}}} I[\Omega(t)]^2\,dt, \qquad (2)$$

где $r_1$ – активное сопротивление обмотки фазы статора.

Учитывая большие пусковые токи, потери энергии (2) практически полностью идут на повышение температуры меди обмотки (ввиду незначительности теплоотдачи). При этом, могут наблюдаться перегревы изоляции обмотки статора при фактически холодном корпусе машины.

Для решения поставленной задачи важным является аналитическое выражение зависимости момента двигателя от скорости, которое обычно задается как функция скольжения [4]:

$$M(s) = \frac{2M_m}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}, \qquad (3)$$

где $M_{\text{кр}}$ – максимальный (критический) момент двигателя, которому соответствует критическое скольжение $s_{\text{кр}}$и критическая скорость $\nu_{\text{кр}} = 1 - s_{\text{кр}}$; $s = \frac{\Omega_0 - \Omega}{\Omega_0} = 1 - \nu$; где $\nu = \frac{\Omega}{\Omega_0}$ –относительная скорость; $\Omega_0$- синхронная скорость (скорость поля).

Как видим, из (3) может быть получена зависимость M(Ω). Недостатком формулы Клосса является то, что пусковой момент, определяемый по формуле (3) в виде

$$M(1) = \frac{2M_m}{\frac{1}{s_{\text{кр}}} + s_{\text{кр}}}$$

практически никогда не совпадает с действительным значением пускового момента, приводимого в каталожных данных на двигатель. Связано это с тем, что максимальный момент определяется сопротивлением ротора при малых скольжениях $r'_{20}$ , в то время как при больших скольжениях сопротивление $r'_{2\text{п}} \gg r'_{20}$ в 1,5-2 раза, что обусловлено эффектом вытеснения тока в стержнях ротора. Сопротивления $r'_{2\text{п}}$ и $r'_{20}$ задаются в каталожных данных, а зависимость $r'_{20}$ от скольжения может быть представлена и аналитически [2].

Предлагается аппроксимирующая функция момента двигателя в виде квадратичной зависимости его от скорости в интервале значений от $\nu = 0$ до критической ($\nu = \nu_{\text{кр}}$).

Так как критическая скорость незначительно отличается от номинальной, то при ее достижении пуск двигателя можно считать завершенным.

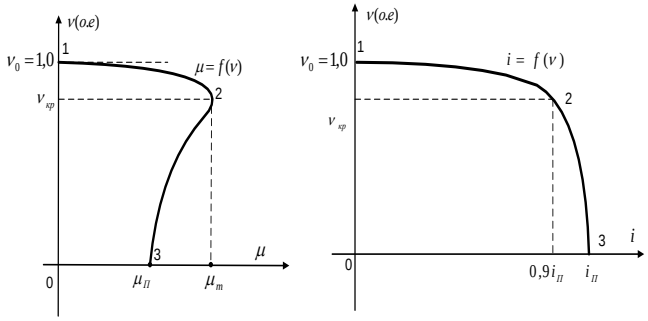
Критическая скорость $\nu_{\text{кр}} = 1 - s_{\text{кр}}$ определяется через критическое скольжение [3]:

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{н}}(\mu_m + \sqrt{{\mu_m}^2 - 1})$$

где $\mu_m = {M_m}/{M_{\text{н}}}$-кратность максимального момента.

## Сущность метода

Характеристики момента и тока $\mu(\nu)$и $i(\nu)$ могут быть построены по каталожным данным двигателя. Вид характеристик и их особенности отражены на рисунке 1.




а) б)

**Рис. 1.** Характеристики асинхронного двигателя, механическая (а);электромеханическая (б)

Характерной является точка критического или максимального момента, точка 2. Если номинальная $n_{\text{н}}$ и синхронная $n_0$ скорости заданы в оборотах в минуту, то в системе СИ скорость (радиан/сек):

$$\Omega_{\text{н}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{н}}}{60}; \qquad \Omega_0 = \frac{2\pi \cdot n_0}{60} \qquad (4)$$

Предлагается аппроксимация механической характеристики на участке 3-2 (Рисунок 1, а)

квадратичной функцией момента от скорости:

$$M = M_{\text{п}} + (M_m - M_{\text{п}})\left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^2 \qquad (5)$$

Разделим равенство (5) на номинальный момент и получим уравнение движения двигателя в относительных единицах, которое справедливо на интервале скорости $0 \le \nu \le \nu_{\text{кр}}$. С учетом представления скорости в относительных единицах $\nu = \frac{\Omega}{\Omega_0}$ получаем аналитическое выражение механической характеристики двигателя:

$$\mu(\nu) = \mu_{\text{п}} + (\mu_m - \mu_{\text{п}})\nu^2 \qquad (6)$$

Выражение (6) используем в уравнении движения (1). Для записи уравнения (1) в относительных единицах разделим на номинальный момент обе части равенства:

$$\frac{M}{M_{\text{н}}} - \frac{M_c}{M_{\text{н}}} = \frac{J}{M_{\text{н}}} \cdot \frac{d\Omega}{dt} \qquad (7)$$

Далее умножим и разделим правую часть выражения (7) на $\Omega_{\text{н}}^2 \approx \Omega_0^2$

$$\frac{J}{M_{\text{н}}} \cdot \frac{d\Omega}{dt} = \frac{J\Omega_{\text{н}}^2}{M_{\text{н}}\Omega_{\text{н}}} \cdot \frac{d}{dt}\left(\frac{\Omega}{\Omega_{\text{н}}}\right)$$

Коэффициент при производной, имеющий размерность времени, называют постоянной инерции двигателя

$$T_j = \frac{J\Omega_{\text{н}}^2}{M_{\text{н}}\Omega_{\text{н}}} = \frac{J\Omega_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}} \qquad (8)$$

Уравнение движения двигателя (1) в относительных единицах принимает вид:

$$\mu(\nu) - \mu_c(\nu) = T_j \frac{d\nu}{dt} \qquad (9)$$

Используем далее обобщенное выражение момента сопротивления $\mu_c(\nu)$ так же в виде квадратичной функцией момента от скорости [3,4]:

$$\mu_c(\nu) = \mu_0 + (\mu_{\text{з}} - \mu_0)\nu^2 \qquad (10)$$

При этом разность моментов, определяемая левой частью выражения (9) получает вид:

$$\mu(\nu) - \mu_c(\nu) = (\mu_{\text{п}} - \mu_0) + \\ +[(\mu_m - \mu_{\text{п}}) - (\mu_{\text{з}} - \mu_0)]\nu^2 \qquad (11)$$

здесь $\mu_0$ – момент сопротивления трогания (для центробежных насосов, в зависимости от вида перекачиваемой жидкости $\mu_0 \approx 0{,}15 \div 0{,}25$), $\mu_{\text{з}} = 0{,}8 \div 0{,}97$ – коэффициент загрузки насоса по моменту.

Вводим коэффициенты:

$$\mu_{\text{п}} - \mu_0 = a^2$$
$$(\mu_m - \mu_{\text{п}}) - (\mu_{\text{з}} - \mu_0) = b^2 \qquad (12)$$

Если $b^2 > 0$, то дифференциальное уравнение движения принимает вид:

$$a^2 + b^2\nu^2 = T_j \frac{d\nu}{dt} \qquad (13)$$

Для решения дифференциального уравнения сделаем разделение переменных

$$dt = T_j \frac{d\nu}{a^2 + b^2\nu^2}$$

и проведем интегрирование

$$\int_0^t dt = T_j \int_0^t \frac{d\nu}{a^2 + b^2\nu^2}$$

Справа имеем табличный интеграл [1], решение при этом имеет вид:

$$t\Big|_0^t = \frac{T_j}{ab} arctg \frac{b}{a}\nu\Big|_0^\nu \qquad (14)$$

Тогда время достижения критической скорости $\nu_{\text{кр}}$, принимаемое за время пуска

$$t_{\text{п}} = \frac{T_j}{ab} arctg \frac{b}{a}\nu_{\text{кр}} \qquad (15)$$

Если в выражении (12) $b^2 < 0$, тогда уравнение движения (13) принимает вид:

$$a^2 - b^2\nu^2 = T_j \frac{d\nu}{dt}$$

Выполняем разделение переменных и интегрируя, получаем:

$$t\Big|_0^t = \frac{T_j}{2ab} ln\left|\frac{a + b\nu}{a - b\nu}\right|\Big|_0^\nu$$

Таким образом, характер изменения скорости от $\nu = 0$ до $\nu$ будет определяется аналитической функцией

$$t = \frac{T_j}{2ab} ln\left|\frac{a + b\nu}{a - b\nu}\right| \qquad (16)$$

Если принять, что пуск фактически заканчивается при достижении критической скорости, то время пуска

$$t_{\text{п}} = \frac{T_j}{2ab} ln\left|\frac{a + b\nu_{\text{кр}}}{a - b\nu_{\text{кр}}}\right| \qquad (17)$$

Дальнейший разгон до номинальной скорости не представляет интереса, так как происходит при быстром уменьшении тока до значения, близкого к номинальному.

Достоинство предлагаемого метода заключается в том, что с его помощью можно получить решение для случая любого напряжения на шинах двигателя, в том числе и для пониженного, постоянного по величине, напряжения.

Учитывая квадратичную зависимость момента от напряжения, пусковой момент будет определяется выражением

$$\mu'_{\text{п}} = \mu_{\text{п}} \cdot u_{(0)}^2 \qquad (18)$$

При выполнении условия $\mu'_{\text{п}} > \mu_0$ двигатель начинает разворачиваться, при этом разгон может быть замедленным.

Это связано с тем, что графики момента и тока зависят от напряжения в виде функции

$$\mu_u(\nu) = \mu_1(\nu) \cdot u^2;$$
$$i_u(\nu) = i_1(\nu) \cdot u \qquad (19)$$

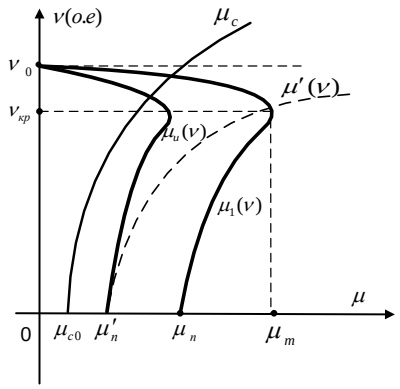



**Рис. 2.** Аппроксимация характеристики $\mu'(\nu)$при восстанавливающимся напряжении

Если провал напряжения в сети вызван пусковыми токами двигателя, то дальнейшее возможное изменение напряжения можно представить двояким образом: либо напряжение восстанавливается по мере разгона двигателя, либо остается неизменным примерно постоянным до достижения критической скорости.

Рассмотрим схему пуска асинхронного двигателя (АД) от мощной высоковольтной сети через трансформатор (Т) ограниченной мощности. При соизмеримости мощности АД и Т на шинах двигателя провал напряжения неизбежен. Схема пуска АД через понижающий трансформатор представлена на рисунке 3,а.

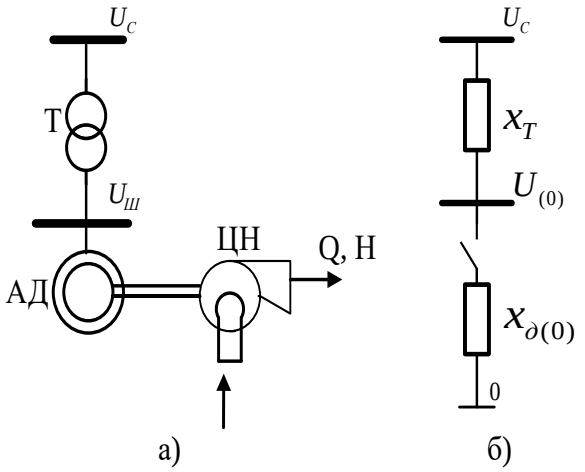



**Рис. 3.** Схема пуска АД в приводе центробежного насоса (а); и его однолинейная схема замещения (б)

Для начального момента пуска находим эквивалентное сопротивление двигателя в омах

$$x_{д(0)} = \frac{U_н}{\sqrt{3}I_п}$$

Представляя это сопротивление в относительных единицах при базисных условиях двигателя, имеем:

$$x_{д(0)} = \frac{U_н}{\sqrt{3}I_п} : \frac{U_н}{\sqrt{3}I_н} = \frac{I_н}{I_п} = \frac{1}{k_i}$$

где $k_i$- кратность пускового тока.

Для эквивалентного сопротивления трансформатора в о.е. при тех же номинальных базисных условиях двигателя, имеем выражение

$$x_т = \frac{u_к\%}{100} \cdot \frac{{U_{тн}}^2}{S_т} \cdot \frac{S_{дн}}{{U_{нд}}^2}$$

где $S_т, S_{дн}$ –полные номинальные мощности трансформатора и двигателя; $U_{тн}$ – номинальное напряжение трансформатора на низкой стороне; $U_{нд}$ - номинальное напряжение двигателя.

Напряжение на шинах двигателя в начальный момент пуска в о.е. определяем, рисунок 3,б:

$$u_{(0)} = u_0 \frac{x_{д(0)}}{x_т + x_{д(0)}}$$

где $u_0$ – напряжение на шинах двигателя до начала пуска (напряжение на низкой стороне напряжения трансформатора в режиме холостого хода).

По мере разгона двигателя и уменьшения тока, напряжение на шинах, равное в начальный момент пуска $u_{(0)}$, будет увеличиваться.

Учитывая известные зависимости момента и тока от напряжения (19) рассматриваем два возможных характера изменения момента.

В первом случае полагаем, что момент двигателя изменяется по квадратичному закону от скорости с начальным значением пускового момента $\mu_п u_{(0)}^2 < \mu_п$. Однако, с увеличением скорости, и, соответственно с уменьшением тока, напряжение на шинах начинает восстанавливаться и постепенно приближаться к $u \approx 1{,}0$. При достижении критической скорости напряжение на шинах принимает значение близкое к номинальному. Для электромеханического процесса нарастания скорости во времени предлагается использовать ту же квадратичную аппроксимацию момента в виде зависимости

$$\mu'(\nu) = \mu_п u_{(0)}^2 + \left(\mu_m - \mu_п u_{(0)}^2\right)\nu^2 \qquad (20)$$

Далее используем выражения коэффициентов (12), которые при принятых условиях будут иметь вид:

$$\mu_п \cdot u_{(0)}^2 - \mu_0 = a^2;$$
$$\left(\mu_m - \mu_п \cdot u_{(0)}^2\right) - (\mu_з - \mu_0) = b^2$$

В случае, если провал напряжения практически не восстанавливается, то вместо максимального момента $\mu_m$ используем значение $\mu_m \cdot$

$u_{(0)}^2$.

Рассмотрим далее пример использования предложенной методики. Зададимся параметрами элементов системы: сеть питания: $U_c = 36\text{кВ} = const$; асинхронный двигатель:

$$U_{\text{нд}} = 6{,}0 \text{ кВ } P_{\text{н}} = 1000\text{кВт}; n_{\text{н}} = 992 \frac{\text{об}}{\text{мин}};$$

$$\eta_{\text{н}} = 0{,}955; \ \cos\varphi_{\text{н}} = 0{,}85; \ {}^{M_m}/_{M_{\text{н}}} = 2{,}2$$

${}^{M_{\text{п}}}/_{M_{\text{н}}} = 1{,}3$; ${}^{I_{\text{п}}}/_{I_{\text{н}}} = 6{,}5$; момент инерции $\mathcal{J}_{\text{р}} = 70$ кг· м$^2$; трансформатор $S_{\text{т}} = 2500\text{кВА}$;

$${}^{U_{\text{в}}}/_{U_{\text{н}}} = {}^{35}/_{6{,}3}\text{ кВ}; \ u_{\text{к}} = 11{,}8\ \%$$

центробежный насос (ЦН), равной по мощности двигателю: момент трогания (о.е) $\mu_0 = 0{,}21$; момент загрузки (о.е) $\mu_{\text{з}} = 0{,}97$; момент инерции $\mathcal{J}_{\text{цн}} \approx 0{,}7\mathcal{J}_{\text{р}}$.

Требуется определить время пуска двигателя:

– при номинальном напряжении;
– при провале напряжения в предположении, что напряжение по мере разгона восстанавливается до начального;
– при провале напряжения, которое не восстанавливается.

### Расчет по предложенной методике

В качестве базисных величин принимаем базисную мощность

$$S_{1\text{д}} = \frac{P_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}} \cdot \cos\varphi_{\text{н}}} = 1232 \text{ кВА}.$$

базисное напряжение на шинах двигателя $U_{\text{нд}} = 6{,}0$ кВ

напряжение сети питания в именованных и в о.е.

$$U_{\text{бс}} = U_{\text{нд}} \frac{U_{\text{тв}}}{U_{\text{тн}}} = 6{,}0 \frac{35}{6{,}3} = 33{,}33\text{кВ};$$

$$u_{\text{с}} = \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{б}}} = \frac{36}{33{,}33} = 1{,}08$$

Параметры двигателя при номинальном напряжении (о.е) при $u_1 = 1{,}0$;

$\mu_m = 2{,}2; \quad \mu_{\text{п}} = 1{,}3$

Параметры нагрузки насоса (о.е)

$$\mu_0 = 0{,}21; \qquad \mu_{\text{з}} = 0{,}97$$

Сопротивление схемы замещения (о.е)

$$x_{\text{т}} = \frac{u_{\text{к}}\%}{100} \cdot \frac{U_{\text{нн}}^2}{S_{\text{Т}}} \cdot \frac{S_{1\text{д}}}{{U_{\text{нд}}}^2} = 0{,}118 \frac{6{,}3^2}{2500} \cdot \frac{1232}{6{,}0^2} = 0{,}064;$$

$$x_{\text{д}(0)} = \frac{x_{\text{д}(0)}}{x_{\text{б}}} = \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot k_i \cdot I_{\text{н}}} : \frac{U_{\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{н}}} = \frac{1}{k_i} = \frac{1}{6{,}5} = 0{,}154.$$

Напряжение на шинах двигателя в начальный момент пуска (о.е)

$$u_{(0)} = u_c \frac{x_{\text{д}(0)}}{x_{\text{т}} + x_{\text{д}(0)}} = 1{,}08 \frac{0.154}{0.064 + 0.154} = 0{,}763$$

Номинальное и критическое скольжения двигателя:

$$s_{\text{н}} = \frac{1000 - 992}{1000} = 0{,}008,$$

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{н}} \left( \mu_m + \sqrt{{\mu_m}^2 - 1} \right) = 0{,}042$$

Критическая скорость в о.е.

$$\nu_{\text{кр}} = 1 - s_{\text{кр}} = 0{,}958$$

Номинальная скорость в радианах в секунду

$$\Omega_{\text{н}} = \frac{2\pi \cdot n_{\text{н}}}{60} = 103{,}3 \text{ 1/с}$$

Расчет постоянной инерции

$$T_j = \frac{\mathcal{J} \cdot \Omega_{\text{н}}^2}{P_{\text{н}}} = \frac{1{,}7 \cdot 70 \cdot 103{,}3^2}{1000 \cdot 10^3} = 1{,}27\text{с}$$

**А.** Расчет времени пуска при номинальном напряжении. Уравнение движения

$$\mu_1(\nu) - \mu_c(\nu) = \mathcal{J} \frac{d\nu}{dt}$$

Момент АД: $\mu_1(\nu) = \mu_{П} + (\mu_m - \mu_{\text{п}}) \cdot \nu^2$

Момент ЦН: $\mu_c(\nu) = \mu_0 + (\mu_{\text{з}} - \mu_0)\nu^2$

Избыточный момент: $\mu(\nu) - \mu_c(\nu) = (\mu_{\text{п}} - -\mu_0) + [(\mu_m - \mu_{\text{п}}) - (\mu_{\text{з}} - \mu_0)]\nu^2$

Используем данные в о.е.

$\mu_{\text{п}} - \mu_0 = 1{,}3 - 0{,}21 = 1{,}09 = a^2$

$\mu_m - \mu_{\text{з}} = 2.2 - 0{,}97 = 1{,}23$

$(\mu_m - \mu_{\text{п}}) - (\mu_{\text{з}} - \mu_0) = 1{,}23 - 1{,}09 = 0{,}14 = b^2 > 0$

Так как $b^2 > 0$, представляем уравнение движения в виде:

$$a^2 + b^2\nu^2 = T_j \frac{d\nu}{dt}$$

при этом

$a = \sqrt{1{,}09} = 1.04; b = \sqrt{0{,}14} = 0.374$

Время разгона до критической скорости по (14)

$$t_{\text{п}} = \frac{T_j}{ab} arctg \frac{b}{a} \nu_{\text{кр}}$$

$$t_{\text{п}} = \frac{1{,}27}{1{,}04 \cdot 0{,}374} arctg \frac{0{,}374}{1{,}04} \cdot 0{,}958 = 1{,}1\text{сек}$$

**Б.** Расчет времени пуска при условии провала напряжения до $u_{(0)}$ и последующего восстановления до $u_0$

Уравнение движения и его составляющие слева от знака равенства в формуле

$$\mu(\nu) - \mu_c(\nu) = \mathcal{J} \frac{d\nu}{dt}$$

АД: $\mu'(\nu) = \mu_{\text{п}} \cdot {u_{(0)}}^2 + \left(\mu_m - \mu_{\text{п}} \cdot {u_{(0)}}^2\right) \cdot \nu^2$

ЦН: $\mu_c(\nu) = \mu_0 + (\mu_{\text{з}} - \mu_0)\nu^2$

Левая часть уравнения движения после подстановки данных

$$a^2 + b^2\nu^2 = 0{,}426 + 0{,}751\nu^2,$$

при этом

$$a = \sqrt{a^2} = 0{,}653; \quad b = \sqrt{b^2} = 0{,}867.$$

Время разгона до критической скорости по (14)

$$t_{\text{п}} = \frac{1{,}3}{0{,}653 \cdot 0{,}867} arctg \frac{0{,}867}{0{,}653} \cdot 0{,}958 = 2{,}1\text{сек}$$

В. Расчет времени пуска при сниженном напряжении $u_{(0)} = 0{,}728 \approx const$

Составляющие уравнения движения

$$\mu^{"}(v) = \mu_{\text{п}} \cdot {u_{(0)}}^2 + \left(\mu_m \cdot {u_{(0)}}^2 - \mu_{\text{п}} \cdot {u_{(0)}}^2\right) \cdot v^2;$$

$$\mu_c(v) = \mu_0 + (\mu_{\text{з}} - \mu_0)v^2$$

Расчетные коэффициенты

$$a^2 = \mu_{\text{п}} \cdot {u_{(0)}}^2 - \mu_0 = 0{,}479, \qquad a = 0{,}692;$$

$$b^2 = \mu_m \cdot {u_{(0)}}^2 - \mu_0 \cdot {u_{(0)}}^2 = -0{,}283,$$

$$b = 0{,}532.$$

Уравнение движения с учетом $b^2 > 0$ принимает вид:

$$a^2 - b^2 v^2 = T_j \frac{dv}{dt}$$

Решение уравнения движения по (16)

$$t = \frac{T_j}{2ab} ln \left|\frac{a + bv}{a - bv}\right|$$

Время разгона до критической скорости:

$$t_{\text{п}} = \frac{1{,}3}{2 \cdot 0{,}692 \cdot 0{,}532} ln|6{,}592| = 3{,}33\text{сек}$$

## Заключение

Для более корректного расчета переходных процессов пуска АД от сети соизмеримой мощности используются каталожные параметры двигателя и элементов сети. Предложенная методика расчета с аппроксимацией характеристики момента в виде квадратичной функции скорости, позволяет при проектировании узла нагрузки электроэнергетической системы, оценивать энергетические показатели процесса пуска и его влияние на питающую сеть, для чего требуются дальнейшие расчеты по формуле (2).

## Список литературы


1. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы/ Г.Б. Двайт. — М., 1973 — 228 с.
2. Олейников А.М. Параметры асинхронных двигателей с учетом магнитного насыщения и вытеснения тока/ А.М. Олейников, А.К. Пронина // Вестник СевНТУ. Механика, энергетика, экология: сб. науч. тр. – Севастополь, 2010.– Вып. 10. – С. 101 – 103.
3. Онищенко Г.Б. Электрический привод. Учебник для вузов - М. РАСХН. 2013. -320.- ил.
4. Сыромятников И.А. Режимы работы асинхронных и синхронных двигателей /И.А. Сыромятников: Под ред. Л.Г. Мамиконянца. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 240 с.


## References


1. Dwight G.B. Tables of integrals and other mathematical formulas / G.B. Dwight. - M., 1973 - 228 p.
2. Oleynikov A.M. Parameters of asynchronous motors taking into account magnetic saturation and current displacement/ A.M. Oleynikov, A.K. Pronina // Bulletin of SevNTU. Mechanics, power engineering, ecology: collection of scientific tr. - Sevastopol, 2010.- Issue 10. - pp. 101 - 103.
3. Onishchenko G.B. Electric drive. Textbook for universities - M. RASKHN. 2013. -320.- il.
4. Syromyatnikov I.A. Operating modes of asynchronous and synchronous motors /I.A. Syromyatnikov: Edited by L.G. Mamikonyants. - 4th ed., reprint. and additional - M.: Energoatomizdat, 1984. - 240 s

УДК621.311

# Обеспечение надежного функционирования единой энергетической системы

О.Н. Титаренко[1], А.М. Шестернева[2]
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, [1]plotnykova198608@mail.ru ,[2]aleksandra0784@mail.ru*

Статья поступила 10.02.2022 г.; после доработки 14.02.2022 г.

***Аннотация***

*В статье рассмотрен вопрос надежного функционирования энергосистемы как приоритетной и базовой задачи электроэнергетики, определяющей основные требования к функциональности и техническому состоянию всех составляющих этой системы.*

*Вопрос надёжного функционирования единой электроэнергетической системы России неразрывно связан с четким и квалифицированным управлением электроэнергетическим режимами и распределением энергии.*

*Ключевые слова:* электроэнергетическая система, системный оператор, интеллектуальная сеть.

# Ensuring reliable functioning of the unified energy system

O.N. Titarenko[1], A.M. Shesterniova[2]
*Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University» Kurchatova Street, 7, Sevastopol, 299015, Russia, [1]plotnykova198608@mail.ru ,[2]aleksandra0784@mail.ru*

Received 10.02.2022 y.; received in final form 14.02.2022 y.

***Abstract***

*The article considers the issue of reliable functioning of the power system as a priority and basic task of the electric power industry, which determines the basic requirements for the functionality and technical condition of all components of this system.*

*The issue of reliable functioning of the unified electric power system of Russia is inextricably linked with a clear and qualified management of electric power modes and energy distribution.*

*Keywords:* electric power system, system operator, smart grid.

## Введение

Надежное функционирование единой электроэнергетической системы предполагает выполнение следующих условий: поддержание баланса спроса и предложения, оптимальной загрузки, соблюдения параметров работы всех элементов оборудования.

К современной электроэнергетической системе выдвигается ряд качественно новых требований, переводящих ее на новую ступень развития.

В первую очередь, требования направлены на повышение эффективности использования энергии и надежности электроснабжения потребителей, а также на возможность значительно более гибкого участия субъектов рынка электроэнергии, в том числе, потребителей электроэнергии, в режимном и противоаварийном управлении в соответствии с их индивидуальными особенностями.

Решение вышеуказанных задач невозможно без проведения единой технической политики, связанной с внедрением интеллектуальных электроэнегетических систем.

Ключевую роль в улучшении надежности работы единой электроэнергетической системы России играет Системный оператор, который

определяет основные требования к функциональности и техническому совершенству систем технологического управления Единой энергосистемы.

В связи с этим совершенствование системы диспетчерского управления является одной из приоритетных задач развития энергетической отрасли. Значительную роль в процессе дальнейшего совершенствования системы диспетчерского управления является автоматизация этой системы.

## Постановка цели научной работы

Целью данной работы является рассмотрение и анализ условий надежного функционирования единой электроэнергетической системы России в современных условиях.

## Особенности единой электроэнергетической системы России

Единая энергосистема - это совокупность объединённых энергосистем, соединённых межсистемными связями, охватывающая значительную часть территории страны при общем режиме работы и имеющая диспетчерское управление.

ЕЭС России охватывает практически всю обжитую территорию страны и является крупнейшим в мире централизованно управляемым энергообъединением.

В настоящее время ЕЭС России включает в себя 77 энергосистем, работающих в составе шести работающих параллельно ОЭС - ОЭС Центра, Юга, Северо-Запада, Средней Волги, Урала и Сибири и ОЭС Востока, работающей изолированно от ЕЭС России. Кроме того, ЕЭС России осуществляет параллельную работу с ОЭС Украины, ОЭС Казахстана, ОЭС Белоруссии, энергосистемами Эстонии, Латвии, Литвы, Грузии и Азербайджана, а также связь с Финляндией через вставку постоянного тока в Выборге.

Основная цель создания и развития Единой энергетической системы России состоит в обеспечении надежного и экономичного электроснабжения потребителей на территории России с максимально возможной реализацией преимуществ параллельной работы энергосистем. В ней работают свыше 700 крупных электростанций, имеющих общую мощность более 250 млн. кВт (84% мощности всех электростанций страны). Управление ЕЭС осуществляется из единого центра.

Энергосистема Российской Федерации состоит из шести объединенных энергосистем (ОЭС) – ОЭС Центра, Средней Волги, Урала, Северо-Запада, Юга и Сибири) и территориально изолированных энергосистем (Чукотский автономный округ, Камчатский край, Сахалинская и Магаданская область, Норильско-Таймырский и Николаевский энергорайоны, энергосистемы центральной и северной частей Республики Саха (Якутия)).

Единая энергетическая система России располагается на территории, охватывающей 8 часовых поясов.

Необходимостью электроснабжения столь протяжённой территории обусловлено широкое применение дальних электропередач высокого (до 500 кВ) и сверхвысокого напряжения (500-1150 кВ). Системообразующая электрическая сеть Единой энергетической системы состоит из линий электропередачи напряжения 220, 330, 500 и 750 кВ. В электрических сетях большинства энергосистем России используется шкала напряжений 110—220 — 500—1150 кВ. В ОЭС Северо-Запада и частично в ОЭС Центра используется шкала напряжений 110—330 — 750 кВ.

ОЭС, входящие в состав ЕЭС России, имеют различную структуру генерирующих мощностей, значительная часть энергосистем не сбалансирована по мощности и электроэнергии.

Основу российской электроэнергетики составляют свыше 700 электростанций суммарной мощностью около 240 ГВт, работающих в составе ЕЭС России. Две трети генерирующих мощностей приходится на тепловые электростанции. Около 55 % мощностей ТЭС составляют теплоэлектроцентрали (ТЭЦ), а 45 % — конденсационные электростанции (КЭС).

Ежегодно все станции вырабатывают около одного триллиона кВт·ч электроэнергии. Сетевое хозяйство ЕЭС России насчитывает более 10 700 линий электропередачи класса напряжения 110 – 1150 кВ.

## Условия надежного функционирования Единой энергетической системы России

Надежность, характеризующая функционирование энергосистемы, обеспечиваются совокупностью мероприятий:

- резервированием генерирующих мощностей и пропускных способностей линий электропередачи;
- оптимизацией электрических режимов с

учетом балансов топлива и гидроресурсов;
- рациональным размещением энергообъектов;
- углублением и совершенствованием автоматизации диспетчерского управления.

В обеспечении надежности электроэнергетических систем основную роль выполняет Системный оператор.

В рамках обеспечения надежного функционирования Единой энергетической системы (ЕЭС) России, Системный оператор управляет электроэнергетическим режимом ЕЭС и выполняет следующие функции:
- расчет электроэнергетических режимов, анализ устойчивости энергосистемы, расчет допустимых потоков мощности по отдельным сетевым элементам и их группам;
- планирование электроэнергетических режимов работы энергообъектов и энергосистем, формирование диспетчерского графика нагрузок электростанций;
- оперативное управление режимом энергосистем в реальном времени;
- управление режимами параллельной работы ЕЭС России с энергосистемами зарубежных государств;
- участие в контроле фактического технического состояния объектов энергетики и расследовании нарушений, влияющих на системную надежность ЕЭС;
- развитие и обеспечение функционирования систем релейной защиты, автоматического управления режимом и противоаварийной автоматики;
- обеспечение надежного функционирования технологических систем диспетчерских центров, создание и обеспечение функционирования системы резервных диспетчерских центров;
- подготовка, поддержание и повышение квалификации персонала.

Одна из особенностей электрической энергии состоит в том, что она не поддается накоплению в экономически значимых промышленных объемах и передается практически мгновенно – со скоростью распространения электромагнитного поля, то есть потребляется в момент производства. Поэтому надежное функционирование энергосистемы обеспечивается при одновременном соблюдении следующих параметров:
- точное соответствие объемов произведенной и потребленной электроэнергии в каждый момент времени
- нахождение всех технических параметров системы в области допустимых значений.

Для обеспечения такого соответствия, с одной стороны, необходимо точное планирование потребления электроэнергии, топологии и пропускной способности сети, с другой стороны, необходимо наличие генерации, способной покрыть это потребление, на любом интервале времени — на секунду, на сутки, на годы вперед. Также для обеспечения баланса между мощностью генерации и мощностью потребления необходим механизм непрерывного управления электрическими станциями, позволяющий оперативно увеличивать или уменьшать их мощность.

В единый процесс производства, распределения и потребления электрической энергии в масштабах Единой энергосистемы России вовлечены одновременно сотни электростанций, тысячи линий электропередачи и миллионы потребителей. Заблаговременно рассчитать и спланировать режимы работы всех объектов энергосистемы, а затем в реальном времени решить задачу управления непрерывным производством, передачей, распределением и потреблением электроэнергии так, чтобы обеспечить в каждый момент времени в каждой точке энергосистемы равенство между производством и потреблением электроэнергии и мощности, способен только Системный оператор, обладающий необходимым инструментарием, технологиями и компетенцией.

С этой целью Системный оператор наделен уникальными правами:
- определять перечень объектов диспетчеризации, объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок потребителей электрической энергии, технологический режим работы и эксплуатационное состояние которых влияют или могут влиять на электроэнергетический режим работы энергосистемы;
- планировать режимы работы этих объектов;
- отдавать на объекты обязательные для исполнения команды и разрешения.

Соответствующие полномочия системного оператора закреплены Федеральным законом № 35 ФЗ «Об электроэнергетике».

Отказ от исполнения диспетчерских команд недопустим кроме случаев, когда их исполнение создает угрозу жизни людей, сохранности оборудования или приводит к нарушению условий безопасной эксплуатации атомных электростанций [1].

Таким образом, можно сделать вывод, что надежное функционирование ЕЭС России в ос-

новном обеспечивает система оперативно-диспетчерского управления.

ОАО «НТЦ электроэнергетики» разработана концепция, предназначенная для определения принципиальных подходов к построению инновационной Единой национальной электрической сети (ЕНЭС), которая бы соответствовала наиболее современным требованиям развития электроэнергетики и охватывала совокупность задач управления режимами функционирования Единой электроэнергетической системы, передающих и распределительных сетей с точки зрения совершенствования технологий производства, передачи, преобразования, распределения и потребления электрической энергии [3].

Интеллектуальная или активно-адаптивная ЕНЭС представляет собой совокупность подключённых к генерирующим источникам, распределительным электрическим сетям и потребителям электроэнергии элементов электрических сетей высокого и сверхвысокого напряжения и систем управления, включающих:

- линии электропередачи, оснащённые при необходимости установками для изменения продольных и поперечных реактивных сопротивлений, а также автоматизированными системами контроля их технического состояния;
- устройства электромагнитного преобразования электроэнергии с широкими возможностями регулирования, а также средства накопления и аккумулирования энергии;
- коммутационные аппараты с высокой отключающей способностью и большим коммутационным ресурсом;
- исполнительные механизмы, позволяющие в реальном масштабе времени воздействовать на активные элементы сети, изменяя её параметры;
- большое количество датчиков положений и текущих режимных параметров с высокой скоростью фиксации показаний в цифровом виде;
- современные цифровые устройства защиты и автоматики;
- информационно-технологические и управляющие системы, в т.ч. программное обеспечение и технические средства адаптивного управления с возможностью воздействия в реальном масштабе времени на активные элементы сети и электроустановки потребителей;
- быстродействующую многоуровневую управляющую систему с различными временными циклами для разных уровней управления;
- систему координации управляющих воздействий при обменах с локальными центрами управления при возникновении аварийных ситуаций.

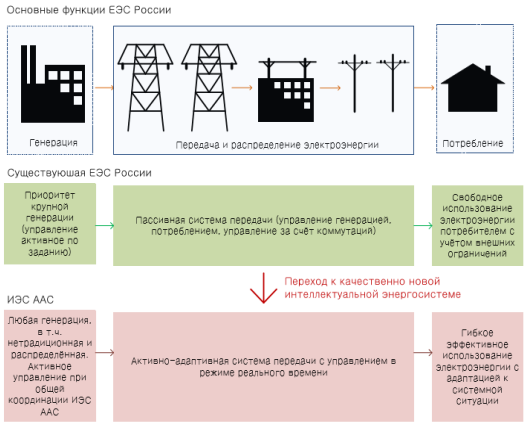



**Рис.1.** Переход к интеллектуальной энергосистеме с активно-адаптивной сетью

## Использование современных цифровых систем диспетчерского управления – инновационное направление в электроэнергетике

Одним из основных инновационных направлений в энергетике, способствующим повышению надежности, является широкое внедрение интеллектуальных сетей, цифровых подстанций, а также использование автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ).

Применение АСДУ позволяет обеспечивать надежное и качественное электроснабжение потребителей электрической энергией, предупреждение аварий, вести непрерывный контроль режимов работы энергообъектов.

Данные системы представляют собой совокупность различных средств, включая технические, аппаратные и программные, которые служат для автоматизации слаженной работы оборудования и персонала, а также обеспечивают рациональный контроль с диспетчерских пультов и пунктов.

Основными достоинствами этой системы можно назвать следующие:

- снижение влияния человеческого фактора, что значительно уменьшает количество ошибок;
- обеспечение функционирования объектов

без постоянного обслуживающего персонала;
- возможность непрерывного контроля над всеми инженерными системами с диспетчерских пультов;
- точное соблюдение технологических нормативов электрической энергии;
- постоянный мониторинг режимов работы энергетических объектов;
- значительное упрощение документооборот и составление отчётов.

АСДУ подстанций можно представить в виде распределенной иерархической системы, на каждом уровне которой решается определенный комплекс поставленных задач, направленных на выполнение основных функций оперативно-технологического управления [4].

Можно выделить три основных уровня автоматизированных систем диспетчерского управления.

Информация, полученная с контролируемых объектов, на первом уровне производится собирается и проходит первичную обработку. Также на этом уровне производится решение определенных локальных задач сигнализации, измерений, диагностики и защиты с дальнейшей передачей результатов первичной обработки на более высокие уровни системы управления. Для этой цели используются программируемые контроллеры сбора данных, производящие сбор информации с микропроцессорных средств защиты и средств учета электроэнергии. Вся аппаратура первого уровня расположена непосредственно на объектах управления (например, подстанциях, линиях электропередачи).

Первый уровень представляет собой сеть программируемых микропроцессорных контроллеров, ведущих процесс сбора и предварительной обработки первичной информации, выполняющих задачи местного управления оборудованием.

Второй уровень - это уровень филиала, который состоит из архивного сервера сбора, обработки и хранения информации, полученной с предыдущего уровня. Здесь находится автоматизированное место диспетчера (АРМ) и диспетчерский щит с его сервером.

Третий (верхний уровень) состоит из АРМ диспетчера и сервера головного офиса.

Данный способ построения автоматизированной системы позволяет создать на территории каждой подстанции оперативный пункт управления, включающий в себя комплекс технических средств защиты, управления, обработки и выдачи информации о состоянии силового оборудования, находящегося на данной подстанции. Такой пункт управления поддерживает обмен данными on-line с более высокими уровнями системы диспетчерского управления.

Таким образом, цифровая автоматизированная система диспетчерского управления осуществляет комплексное управление и защиту объектов электроэнергетики на всех режимах ее работы.

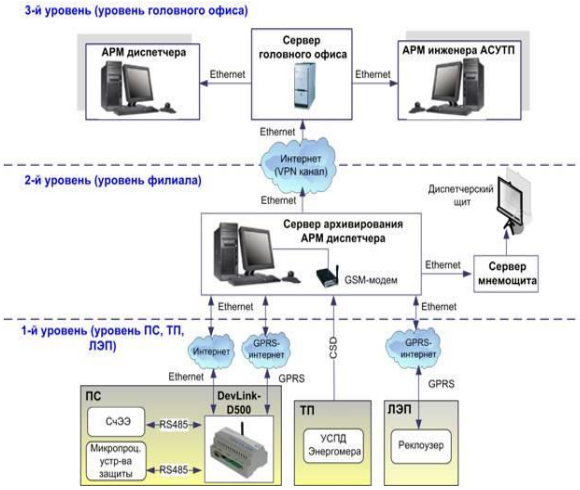



**Рис. 2.** Структурная схема автоматизированной системы диспетчерского управления

## Заключение

Надежное функционирование единой электроэнергетической системы России обеспечивается при одновременном соблюдении следующих параметров: точное соответствие объемов произведенной и потребленной электроэнергии в каждый момент времени; нахождение всех технических параметров системы в области допустимых значений.

Заблаговременно рассчитать и спланировать режимы работы всех объектов энергосистемы, а затем в реальном времени решить задачу управления непрерывным производством, передачей, распределением и потреблением электроэнергии способен Системный оператор, обладающий необходимым инструментарием, технологиями и компетенцией.

Автоматизация диспетчерского управления, а также создание интеллектуальных сетей и цифровых подстанций является одним из основных перспективных направлений энергетической отрасли, позволяющих успешно решать задачи мониторинга и регулирования сложных процессов в электроэнергетической системе с целью повышения ее энергетической эффективности и

надежности.

## Список литературы

1. Федеральный закон от 26.03.2003 N 35-ФЗ (ред. от 29.07.2017) "Об электроэнергетике".
2. Федеральный закон "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 23.11.2009 N 261-ФЗ.
3. Троицкий А. А. Об экономической оценке энергетических инноваций развития тепловых электростанций России // Электрические станции. 2013. № 7.
4. Пилипенко Г. В. Тенденции построения технологической сети связи электроэнергетики в современных условиях // Электрические станции. 2014. № 3.

## References

1. Federal Law No. 35-FZ of March 26, 2003 (as amended on July 29, 2017) "On the Electric Power Industry".
2. Federal Law "On Energy Saving and Increasing Energy Efficiency and on Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation" dated November 23, 2009 N 261-FZ.
3. Troitsky A. A. On the economic assessment of energy innovations in the development of thermal power plants in Russia // Elektricheskie stantsii. 2013. № 7.
4. Pilipenko G. V. Trends in building a technological communication network of the electric power industry in modern conditions // Elektricheskie stantsii. 2014. №3.

УДК 620.92

# Актуальность замены действующей отопительной котельной на теплонасосную установку

А.М. Шестернёва[1], О.Н. Титаренко[2],Г.С. Скакун[3]
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,*
*г. Севастополь, 299053, Россия, [1]aleksandra0784@mail.ru, [2]plotnykova198608@mail.ru, [3]skakun2000@gmail.com.*

Статья поступила 14.02.2022 г.; после доработки 16.02.2022 г.

***Аннотация***

*В статье рассмотрены возможности и перспективы применения теплонасосной установки как экологически чистой, энергоэффективной,и высокотехнологичной системы. Произведен расчет параметров действующей котельной в поселке Голландия г. Севастополя и рассмотрена перспектива замены ее на парокомпрессионную теплонасосную установку.*

*Ключевые слова:*тепловой насос, минимальные затраты, технология, теплоснабжение.

# The relevance of replacing the existing heating boiler house with a heat pump unit

A.M. Shesterneva[1], O.N. Titarenko[2], G.S. Skakun[3]
*Sevastopol state university, 33Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia,,*
*[1]aleksandra0784@mail.ru, [2]plotnykova198608@mail.ru,[3]skakun2000@gmail.com.*

Received 14.02.2022 y.; received in final form 16.02.2022 y.

***Abstract***

*The article discusses the possibilities and prospects for the use of a heat pump installation as an environmentally friendly, energy efficient, and high-tech system. The parameters of the existing boiler house in the village of Holland, Sevastopol, were calculated and the prospect of replacing it with a vapor-compression heat pump plant was considered.*

*Keywords*: heat pump, minimum costs, technology, heat supply.

## Введение

Тепловой насос(ТН) или теплонасосная установка(ТНУ) - экологически чистая система, позволяющая получать тепло для отопления и горячего водоснабжения жилых домов за счет использования низкопотенциальных источников тепла и переноса его к теплоносителю с более высокой температурой. В качестве низкопотенциальных источников могут использоваться грунтовые и артезианские воды, озера, моря, тепло грунта, вторичные энергетические ресурсы - сбросы, сточные воды, вентиляционные выбросы и т.п. Затрачивая 1 кВт электрической мощности в приводе компрессионной теплонасосной установки (ТНУ), можно получить 3-4, а при определенных условиях и до 5-6 кВт тепловой мощности.

Популярность тепловых насосов обоснована возможностью получения тепловой энергии непосредственно на месте установки оборудования. При высокой экологичности она обладает высокой степенью взрывобезопасности и пожаробезопасности. Также тепловые насосы не требуют прокладки топливных магистралей и систем дымоудаления, соответственно не требуют затрат на эти нужды.

Задачей исследования данной статьи является возможность замены действующей отопительной котельной, расположенной в поселке Голландия на современную теплонасосную установку.

## Обзор существующих проектов и перспектив применения теплонасосных установок на территории России и за рубежом

Теплонасосные установки входят в перечень объектов и технологий, которые относятся к объектам и технологиям высокой энергетической эффективности. Создание комплекса технологического оборудования и разработка технического решения по использованию тепловых насосов в системе теплоснабжения – сложная задача, требующего комплексного подхода. Для понимания перспективы внедрения такой теплонасосной системы на конкретном объекте, необходимо четко понимать ее принцип работы и учитывать опыт применения таких систем на других территориях. Среди различных видов тепловых насосов наибольшее распространение в мире получили парокомпрессионные теплонасосные установки. В данной статье будем рассматривать именно такой вид ТНУ.

Принцип работы парокомпрессионного теплового насоса, аналогичен принципу действия холодильника. У обоих есть испаритель, компрессор, конденсатор и дросселирующее устройство. Цикл работы у холодильника и теплового насоса абсолютно одинаков, а разнятся только параметры настройки. Фреон подбирается такой, чтобы мог закипеть даже при минусовой температуре.

Поэтому, когда совсем холодную воду прогоняют через каналы испарителя, жидкий фреон все равно испаряется. Далее пар втягивается в компрессор, где сжимается. При этом его температура сильно увеличивается (до 90-100 градусов). Затем, сжатый фреон направляется в теплообменник конденсатора, охлаждаемый водой или воздухом. На холодных поверхностях пар конденсируется, превращаясь в жидкость, а его тепло передается охлаждающей воде, которая подогревается до температуры +60С. Воду используют в системе отопления или горячего водоснабжения, а фреон, теперь снова жидкий, направляется на дросселирующий вентиль, проходя через который он теряет давление и температуру, а затем опять возвращается в испаритель. Цикл завершился, и будет автоматически повторяться, пока работает компрессор. На рис.1 приведена принципиальная схема парокомпрессионного теплового насоса.

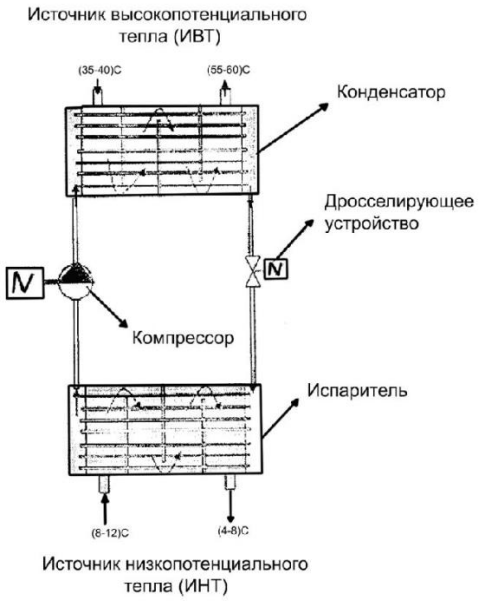



**Рис.1** Принципиальная схема парокомпрессионного теплового насоса.

В настоящий момент в мире работает более 30 млн ТН различной мощности – от нескольких кВт до сотен МВт. В России присутствует значительный интерес к теплонасосным технологиям, однако количество реализованных проектов незначительно.

Наиболее развитый рынок тепловых насосов — государства Европы. Не отстают и другие экономически развитые страны, заинтересованные в энергосбережении, — США, Япония, Австралия. Популяризации тепловых насосов способствуют высокие цены на ископаемое топливо, государственные программы, поощряющие замену традиционных котлов экологичным и энергосберегающим оборудованием, а также мягкий климат, подходящий для эффективной беспрерывной работы таких устройств. На рис. 2 представлен график продажи тепловых насосов в Европе за 2016 и 2017 год в разных странах.

Рассмотрим конкретнее несколько стран.

1) США:

Чтобы снизить затраты на энергоносители и популяризировать тепловые насосы, правительство США приняло закон, обязывающий строительные компании устанавливать их во всех новых построенных зданиях. Кроме того, в США широко используется солнечная энергия для отопления и подогрева воды для бытовых нужд. Объединение теплового насоса с солнечными

коллекторами повышает продуктивность системы отопления в несколько раз.

2) Италия:

В Италии продажи тепловых насосов с каждым годом растут как в денежном выражении, так и в пересчете на единицы оборудования.

Важную роль здесь играют фискальные стимулы, призванные обеспечивать стабильность экономики и вовлекать новых людей и компании.

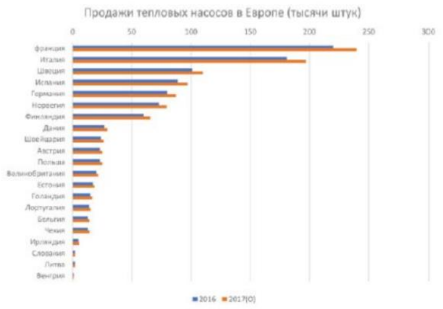



**Рис 2.** График продажи ТН в Европе.

В стране действует 65-процентный налоговый вычет для расходов на повышение энергоэффективности зданий, более известный как экологическая субсидия. С ежегодного одобрения правительства предоставляется 50-процентный налоговый вычет для расходов на ремонт. Кроме того, согласно закону «Конто термико» (Contotermico), для повышения энергоэффективности здания владелец может получить рассрочку, если затраты превышают 5000 евро.

Еще один фактор, способствующий распространению тепловых насосов, — их частое использование в проектах по реконструкции зданий.

На рис. 3 и 4 представлены графики продажи ТН в Италии как в денежном выражении, так и в пересчете на единицы оборудования

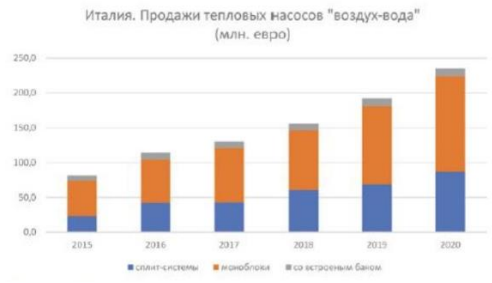



**Рис 3.** График продажи ТН в Италии в денежном выражении с 2015 по 2020 года.

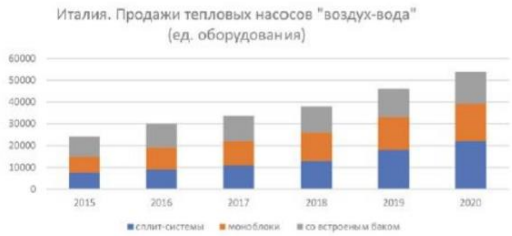



**Рис 4.** График продажи ТН в Италии в пересчете на единицы оборудования с 2015 по 2020 года.

3) Швеция:

Стокгольм стал первым городом Швеции, перешедшим на отопление тепловыми насосами. Источником тепла для них служат воды Балтийского моря. В населенных пунктах, расположенных далеко от побережья, широко применяются воздушные тепловые насосы.

Швеция стала лидером по внедрению тепловых насосов, чему способствуют государственные дотации на их установку.

5) Россия:

В 2006 году компания Daikin представила на российском рынке тепловые насосы, но востребованность этого оборудования в нашей стране оказалась невелика.

Максимум спроса на тепловые насосные установки в России пришелся на 2013 год, когда было продано 1800 единиц оборудования.

В 2017 году объем рынка не превышал 850 тепловых насосов. 130 из них составили аппараты «воздух — вода» для отопления и горячего водоснабжения общей стоимостью 495 000 долларов США. Кроме того, были проданы 280 установок для подогрева воды в бассейнах на сумму 178 000 долларов.

Сегмент очень мал и с каждым годом становится меньше. Собственного производства тепловых насосов в Российской Федерации нет, а импортные системы очень дороги, так что увеличение продаж этой техники не прогнозируется.

Причины сложности применения ТНУ в России следующие:

Во-первых -большие капитальные затраты. Установка газового или электрического котла сравнимой тепловой мощности обойдется до 8 раз дешевле. Тепловой насос, в свою очередь, требует проектирования с нуля, очень часто — проведения дорогостоящих буровых работ. Затратными получаются и монтаж, и пуско-наладочные работы.

Во-вторых -низкая эффективность при суровых зимах с температурой более -10 °С в боль-

шинстве регионов России. Из-за этого приходится дополнительно устанавливать обогреватели – котлы или камины и смысл в дорогостоящей ТНУ теряется.

Вторая проблема внедрения ТНУ в России решается в случае применения ее в Южных регионах. Так как в таких регионах как Краснодарский Край, Крым и другие температурные режимы значительно выше, нежели в Северных регионах, то возможность применения ТНУ значительно возрастает.

Так же в этих регионах возможно внедрение комбинированной системы энергоснабжения, включающей в себя возобновляемые источники энергии, что делает возможность применения ТНУ еще более перспективной.

## Анализ возможности замены котельной, расположенной в поселке Голландия, на парокомпрессионную ТНУ

Так как применение ТНУ в Южных регионах России обосновано, мы предлагаем произвести расчет возможности замены действующей отопительной котельной на теплонасосную установку в поселке Голландия г. Севастополя.

План анализа возможности замены действующей котельной на ТНУ.

1) Получить данные по отоплению котельной.

2) По полученным данным о выдаче тепла с котельной, рассчитать теплонасоснуюустновку.

3) Рассчитать расходы топлива на выработку тепла как в котельной, так и в ТНУ.

4) Рассчитать годовую экономию условного топлива.

5) Сравнить потребляемые электрические мощности.

6) Выявить необходимость замены трансформаторных подстанций в связи с изменением потребляемой мощности.

7) Сделать выводы.

## Данные отопительной котельной

На момент написания данной статьи, существует документ «Схема теплоснабжения города Севастополя на период до 2033», который утверждает строительство и развитие уже существующих схем теплоснабжения Севастополя.

Из данного документа и получим данные о котельной, которую мы заменяем.

Котельная находится в районе, указанном на рис.5:

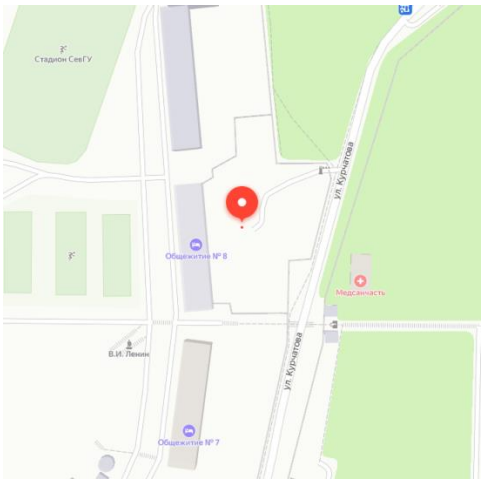



**Рис.5** Местонахождение котельной.

Топливо, потребляемое котельной – газ;

Тип теплоносителя – горячая вода.

На данной котельной стоит:

- Два сетевых насоса для подачи горячей воды по теплофикационным сетям, типа КМ90/50, потребляемой мощностью 15 кВт и производительностью 90 $м^3$/ч;
- Два циркуляционных насосов для горячей воды(ГВС) типа КМ20/30, потребляемой мощностью 5,5 кВт и производительностью 3,5 $м^3$/ч;
- Два подпиточных насоса типа К20/30, потребляемой мощностью 5,5 кВт и производительностью 5,5 $м^3$/ч;
- Четыре водогрейных котла типа НИИСТУ-5, номинальной теплопроизводительностью 0,5 МВт;
- Один паровой котел типа Е-2,5-0,9 ГМН, номинальной паропроизводительностью 2,5 т/ч.

Протяженность тепловой сети в однотрубном исчислении составляет 2000 метров;

Установленная тепловая мощность: 4628,74 кВт;

Расход тепла на собственные нужды составляет 26,7 кВт;

Электрическая мощность исходя из удельного расхода электроэнергии на один Гкал: 60,22 кВт;

Продолжительность работы в год: 4200 ч/год.

Так как для ТНУ необходим подвод низкопотенциального теплоносителя, мы оставляем

питательные насосы, которые использовала котельная для облегчения расчетов.

### Расчет теплонасосной установки

1) Определяем абсолютную температуру испарителя:

$$T_1 = 273 + (t + \Delta t) = 273 + (20 - 5) = 288\ K$$

(1) где: Δt – температурный перепад в испарителе, для ТНУ принимаем 5°С.

2) Определяем абсолютную температуру конденсатора:

$$T_2 = 273 + 70 = 343\ K \qquad (2)$$

Температуру $t_2$ принимаем 70°С, т.к. не присутствуют дополнительные условия.

3) Определяем теоретический коэффициент преобразования теплоты:

$$\varphi_T = \frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{343}{343 - 288} = 6{,}23 \qquad (3)$$

Для компрессора мощностью более 3000 кВт принимаем η = 0,6.

4) Определяем действительный коэффициент преобразования теплоты:

$$\varphi_Д = \varphi_T \cdot \eta = 6{,}23 \cdot 0{,}6 = 3{,}74 \qquad (4)$$

5) Определяем мощность двигателя:

$$N_Э = \frac{Q_{ТН}}{\varphi_Д} = \frac{4628{,}74}{3{,}74} = 1237{,}63 \text{ кВт} \qquad (5)$$

6) Определяем тепловую мощность эквивалентно выработанной электроэнергии в районной станции:

$$Q_{КЭС} = \frac{N_Э}{\eta_{КЭС}} = \frac{1327{,}63}{0{,}75} = 1650{,}17 \text{ кВт} \qquad (6)$$

где: $\eta_{КЭС}$ – КПД конденсатора ЭС, принимаем 0,75.

7) Определяем расход топлива на выработку тепла в ТНУ:

$$B_Т = N_Э \cdot b_{КЭС} = 1237{,}63 \cdot 0{,}15 = 185{,}6 \text{ кг.у.т} \qquad (7)$$

где: $b_{КЭС}$ = 0,15 кг у.т/кВт·ч – удельный расход условного топлива для выработки 1 кВт электроэнергии.

8) Определяем расход топлива на выработку тепла в котельной:

$$B_К = \frac{Q_{ТН}}{Q_{У.Т} \cdot \eta_К} = \frac{16{,}66 \cdot 10^6}{29300 \cdot 0{,}75} = 758{,}13 \text{ кг.у.т} \qquad (8)$$

где: $\eta_К$ – КПД конденсатора установки;

$Q_{у.т.}$- стандартная величина.

9) Определяем годовую экономию условного топлива:

$$\Delta B = (B_К - B_Т) \cdot \tau = (758{,}13 - 185{,}6) \cdot 4200 =$$

$$= 2402{,}4 \text{ т.у.т/год} \qquad (9)$$

Так как из расчета видно, что в экономии условного топлива в год составляет 2402,4 т у.т./год, то установка ТНУ в данных условиях целесообразна.

По сравнению с действующей котельной, ТНУ потребляет гораздо больше электрической мощности. Существующая трансформаторная подстанция не имеет запаса мощности, необходимой для ТНУ.Из этого следует необходимость замены трансформаторной подстанции в пос. Голландия с выделением мощности на ТНУ. На первый взгляд можно сказать, что не имеет смысла установка ТНУ, влекущая за собой замену еще и трансформаторов действующей ТП, но если рассмотреть утвержденный план развития района, то становится понятным, что на ближайшие 10 лет в районе Голландия планируется изменения. Утвержден план строительства детского сада, нескольких многоэтажных домов, магазинов. Для этих потенциальных потребителей существующей мощности ТП будет недостаточно. Таким образом, можно сделать вывод, что замена трансформаторов на ТП или строительство новой ТП будет в любом случае. Мы предлагаем учесть мощность, требуемую для ТНУ при рассмотрении вопроса энергоснабжения района. Рассмотрим мощность, необходимую для реализации предложенного решения.

### Расчет и выбор трансформаторов

Районная котельная отапливает четыре общежития, шесть жилых домов и один корпус института.

Так как большинство потребителей энергии в районе — это жилые дома и институт, то мы задаемся коэффициентом мощности: φ =0,85.

Из расчета на то, что в одном жилом доме 50 квартир, а на одну квартиру принимаем 5 кВт элекроэнергии, то получается, что на один дом приходит 250 кВт электроэнергии. Допускаем, что общежития потребляют электричество также, как и жилой дом.

Также делаем допущение, что институт потребляет энергию как 3 жилых дома.

Из этого рассчитываем полную мощность, отдаваемую от трансформаторных подстанций(ТП):

1) Потребляемая полная мощность ТНУ:

$$S_{ТНУ} = \frac{P_{ТНУ}}{\cos\varphi} = \frac{1237{,}63}{0{,}85} = 1455{,}3 \text{ кВА}$$

(10)где $P_{ТНУ} = N_Э$.

2) Потребляемая полная мощность жилого

дома:

$$S_{ДОМА} = \frac{P_{ДОМА}}{\cos\varphi} = \frac{250}{0{,}85} = 294 \text{ кВА}$$

(11)

3) Потребляемая полная мощность корпуса института:

$$S_{ИНСТ} = \frac{P_{ИНСТ}}{\cos\varphi} = \frac{3 \cdot 250}{0{,}85} = 882 \text{ кВА}$$

(12)

4) Полная мощность, отдаваемая от двух трансформаторных подстанций:

$$S_{ТП} = S_{ТНУ} + 10 \cdot S_{ДОМА} + S_{ИНСТ} = 1455{,}3 + 10 \cdot$$

$$\cdot 294 + 882 = 5277{,}3 кВА$$

(13)

Тогда, полная мощность, отдаваемая от одной трансформаторной подстанции будет равна 2638,7 кВА.

Так как на одной ТП обычно расположено два трансформатора, которые в нормальном режиме работы нагружены на 70% каждый, то можно посчитать мощность, которая выдается с одного трансформатора.

Она будет равна 923,5 кВА при загрузке на 70%. А мощность при полной загрузке будет равна 1319,3 кВА.

По этим данным мы выбрали трансформатор типа ТСЛ – 1600/10 – УЗ, так как он покрывает мощность при полной нагрузке и есть резерв для возможной застройки новых домов.

Если говорить о ТНУ, то найти установку на такую тепловую мощность оказалось проблематично, и, скорее всего, ее требуется создавать под заказ. Другой вариант, можно взять тепловой насос марки SDW10-180, номинальной выходной тепловой мощностью 550 кВт и поставить девять таких насосов работающих параллельно на отопительную сеть.

Вид насоса представлен на рисунке 6:



**Рис. 6** Тепловой насос марки SDW10-180

## Заключение

В данной статье мы предлагаем внедрить современную, экологически чистую систему отопления в существующий район.

Из расчетов видно, что установка ТНУ дает экономию условного топлива при ее эксплуатации по сравнению с действующей котельной, установленной в районе Голландии. Данная система отопления использует природный ресурс - энергию моря, которое расположено в данном районе. Единственным препятствием для установки экологически чистой системы отопления является нехватка электрической мощности от действующей ТП. Мощность, необходимую для установки ТНУ в данном районе, мы рассчитали. Решить вопрос нехватки мощности возможно в более дальней перспективе, учтя ее при плановой замене трансформаторов на действующих ТП при развитии района.

Учитывая тот факт, что теплонасосные установки являются экологически чистыми системами, имеющими перспективу внедрения на территории России как энергоэффективные системы и рассмотрев особенности Южных регионов России, можно сделать вывод, что их внедрение актуально. В качестве примера такого внедрения мы рассмотрели замену действующей котельной на ТНУ. Проведя анализ технического решения, считаем внедрение актуальным в отдаленной перспективе при развитии района.

## Список литературы


1. Схема теплоснабжения города Севастополя на период до 2033 г. Утверждаемая часть https://sevastopolteplo.ru/images/shema.pdf
2. Схема теплоснабжения города Севастополя на период до 2033 г. Сводный том изменений выполненных при актуализации схемы до 2033 г. - https://sev.gov.ru/files/iblock/b92/-svodnyy-tom-izmeneniy-pravka-14.02.18.pdf
3. Схема теплоснабжения города Севастополя на период до 2033 г. Обосновывающие материалы к схеме теплоснабжения Приложение к Книге 1 Часть 2 Тепловые сети источников ГУПС «Севтеплоэнерго» - https://sev.gov.ru/files/iblock/ad1/prilozhenie-kniga-1-chast-2.pdf
4. https://mir-klimata.info/teplovye-nasosy-u-nas-i-u-nih/Марк Курза, EurasianResearchGroup в сотрудничестве с «Литвинчук Маркетинг» По Редакция МКХ -18.08.20180644
5. http://teplovoy-nasos.com/Информация/Детальные-материалы-о-технологии-тепловой-насос.html - Детальные материалы о технологии «Тепловой насос»


## References


1. The heat supply scheme of the city of Sevastopol for the period up to 2033. The approved part - https://sevastopolteplo.ru/images/shema.pdf
2. The scheme of heat supply of the city of Sevastopol

for the period up to 2033. Summary volume of changes made during the updating of the scheme up to 2033 - https://sev.gov.ru/files/iblock/b92/-svodnyy-tom-izmeneniy-pravka-14.02.18.pdf
3. 3) The scheme of heat supply of the city of Sevastopol for the period up to 2033. Supporting materials for the heat supply scheme Appendix to the Book 1 Part 2 Heat supply networks of the GUPS "Sevteploenergo" - https://sev.gov.ru/files/iblock/ad1/prilozhenie-kniga-1-chast-2.pdf
4. https://mir-klimata.info/teplovye-nasosy-u-nas-i-u-nih/Mark Kurza, Eurasian Research Group in cooperation with Litvinchuk Marketing, Editorial Board of the MKX - 18.08.20180644
5. http://teplovoy-na-sos.com/Информация/Детальные-материалы-о-технологии-тепловой-насос.html - Detailed materials about the "Heat pump" technology

## НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

# Использование энергосберегающих технологий для системы электрического освещения города на основе фотоэлектрических преобразователей

В.В.Кувшинов [1], Е.Г. Какушина[2], Д.И. Тиман [3], Д.Ф. Бордан [4], Р.А. Нашев [5]
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,*
*г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com [2]littie@mail.ru, [3]timan@mail.ru*
*[4]bordan79@mail.ru, [5] nashev@mail.ru*

Статья поступила 04.02.2022 г.; после доработки 07.02.2022 г.

***Аннотация***
*Тема данной работы, в первую очередь подразумевает возможности использования солнечных батарей и организацию освещения в Крымском регионе.*

*Ключевые слова:* система автоматического управления уличным освещением, коэффициенты яркости, импульсные преобразователи напряжения.

# The use of energy-saving technologies for the city's electric lighting system based on photovoltaic converters

V.V. Kuvshinov [1], E.G. Kakushina [2], D.I. Timan [3],
D.F. Bordan [4], R.A. Nashev [5]
*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,*
*[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com [2]littie@mail.ru, [3]timan@mail.ru*
*[4]bordan79@mail.ru, [5] nashev@mail.ru*

Received 04.02.2022 y.; received in final form 07.02.2022 y.

***Abstract***
*The topic of this work primarily implies the possibility of using solar panels and the organization of lighting in the Crimean region.*

*Keywords:* automatic control system for street lighting, brightness coefficients, pulse voltage converters.

## Введение

Исходя из данных Крымский полуостров наиболее подходящий регион в России для использования светильников уличного освещения с солнечными накопителями. Дело в том, что здесь наблюдается один из самых высоких в России уровень интенсивности солнечного излучения - до 1460 кВтч/км2 [3].

Энергоэффективность – очень актуальная тема для Крымского полуострова, в связи с этим все направления работы по этой проблеме можно признать весьма необходимым. Сети уличного освещения являются неотъемлемой частью инженерной инфраструктуры любого муниципального хозяйства. Затраты на освещение в сетях уличного освещения в населенных пунктах оцениваются около 30% от всех муниципальных затрат на электроэнергию, и с учетом дополнительных расходов на обслуживание сетей освещения составляют весьма значительную долю в

структуре муниципальных бюджетов. Уменьшение энергопотребления важно не только в экономическом плане – это реальный вклад в развитие энергетической независимости Крыма.

К источникам света являющимся энергоэффективными относятся газоразрядные лампы и светодиодные светильники.

Использование для освещения источников света на основе полупроводников предпочтительнее, поскольку по сравнению с люминесцентными и натриевыми лампами [1], светодиодные светильники обладают рядом существенных технических преимуществ:



**Рис.1.** ЖКУ21-250-011 Гелиос

***Таблица 1.*** *Характеристики газоразрядного источника света ДНАТ*

| По проезжей части | | По тротуару (правый) | | По тротуару (левый) | |
|---|---|---|---|---|---|
| Показатель | Объект - 1 | Показатель | Объект - 1 | Показатель | Объект - 1 |
| $L_{ср}$, кд/м$^2$ | 2.01 | $E_{ср}$, лк | 12.1 | $E_{ср}$, лк | 12.1 |
| $L_{мин}/L_{ср}$ | 0.55 | $E_{макс}$, лк | 16.3 | $E_{макс}$, лк | 16.3 |
| $L_{мин}/L_{макс}$ | 0.71 | $E_{мин}/E_{ср}$ | 0.75 | $E_{мин}/E_{ср}$ | 0.75 |
| Eср, лк | 28.9 | $E_{макс}/E_{ср}$ | 1.3 | $E_{макс}/E_{ср}$ | 1.3 |
| $E_{макс}$, лк | 50.1 | $E_{пц,\ мин}$, лк | 2.4 | $E_{пц,\ мин}$, лк | 2.4 |
| $E_{мин}/E_{ср}$ | 0.53 | UE | 0.03 | UE | 0.03 |
| $E_{макс}/E_{ср}$ | 1.7 | | | | |
| TI, % | 12.1 | | | | |
| P | 72 | | | | |
| UE | 0.55 | | | | |

Норма согласно СНиП:

Средняя яркость покрытия Lcp, кд/м2 – 1,6

Средняя горизонтальная освещенность покрытия, лк – 20

Предлагаемая замена на светодиодах:

Наименование - Светильник консольный GALAD Урбан L LED-259-ШБ1/У50 (120/I/4kV/NW/0/YW360F/1)

Средняя яркость покрытия Lcp, кд/м2 – 2,08

Средняя горизонтальная освещенность, лк – 33,7

Коэффициент мощности, не менее – 0,96

***Таблица 2.*** *Характеристики светодиодного источника света GALAD*

| По проезжей части | | По тротуару (правый) | | По тротуару (левый) | |
|---|---|---|---|---|---|
| Показатель | Объект - 2 | Показатель | Объект - 2 | Показатель | Объект - 2 |
| $L_{ср}$, кд/м$^2$ | 2.08 | $E_{ср}$, лк | 15.0 | $E_{ср}$, лк | 15.0 |
| $L_{мин}/L_{ср}$ | 0.56 | $E_{макс}$, лк | 21.3 | $E_{макс}$, лк | 21.3 |
| $L_{мин}/L_{макс}$ | 0.78 | $E_{мин}/E_{ср}$ | 0.66 | $E_{мин}/E_{ср}$ | 0.66 |
| Eср, лк | 33.7 | $E_{макс}/E_{ср}$ | 1.4 | $E_{макс}/E_{ср}$ | 1.4 |
| $E_{макс}$, лк | 53.5 | $E_{пц,\ мин}$, лк | 2.7 | $E_{пц,\ мин}$, лк | 2.7 |
| $E_{мин}/E_{ср}$ | 0.56 | UE | 0.03 | UE | 0.03 |
| $E_{макс}/E_{ср}$ | 1.6 | | | | |
| TI, % | 8.3 | | | | |
| P | 49 | | | | |
| UE | 0.57 | | | | |



**Рис.2.** Светильник консольный GALAD Урбан L LED-259

Для работы светодиодного светильника необходим качественный источник питания. Он называется драйвер светодиодов или просто драйвер.

Устанавливается он с целью выделения источников питания, предназначенных непосредственно для светодиодного освещения. Драйвер является важнейшей частью светодиодного светильника и во многом определяет светотехнические, функциональные показатели и надежность самого устройства в целом [2].

Отличительной особенностью светодиодов

является: зависимость светотехнических характеристик от низкого напряжения питания и протекающего тока. В силу того, что вольтамперная характеристика светодиодов нелинейная, при превышении порогового значения напряжения ток, протекающий через светодиод, начинает экспоненциально расти. Драйвер для светодиода обеспечивает на выходе стабильный выходной ток и напряжение. Обычно в источнике питания светодиодов, работающих от бытовой сети 220 В 50 Гц, приходится гасить излишки напряжения, включенного в цепь светодиодов последовательно [5]. Недостатком этого метода является то, что яркость светодиодов будет меняться при изменении напряжения в сети. Кроме этого, в момент подачи питания на светодиоды, через них кратковременно протекает пусковой ток, который многократно превышает максимально допустимый, а это в свою очередь может привести к выходу их строя.

Стабилизацию так же можно обеспечить с помощью линейного стабилизатора. Этот вид стабилизаторов, в основном, используется в таком оборудовании, в котором низкий КПД и выделение тепла не имеют большого значения, а вместе с тем желательны низкая стоимость и короткие сроки разработки. Из соображений безопасности перед линейными стабилизаторами размещается каскад источника питания, обеспечивающий гальваническую развязку от сети переменного тока. Недостатками таких стабилизаторов являются ограниченный диапазон тока нагрузки; большие потери; низкий КПД; сильный нагрев при регулировании больших токов [8-9].

Импульсные преобразователи напряжения с использованием индуктивных накопителей энергии применяют для преобразования напряжения одного уровня в напряжение другого. Такие преобразователи отличаются высоким КПД, достигающим до 95 %. Импульсный стабилизатор, работающий на высокой частоте, это наиболее рациональный способ питания светодиодов. Структура драйвера с индуктивным накопителем энергии представлена на рис. 3.

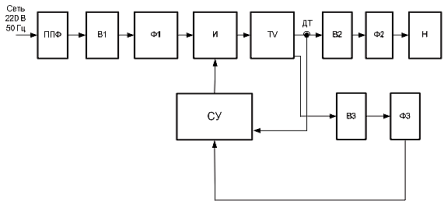



**Рис.3.** Структурная схема источника питания светильника

Яркость $L_{i,k}$ [кд/м$^2$] в $i$-той точке расчетного поля, видимая наблюдателем при его расположении на $k$-той полосе движения, определяется как:

$$L_{i,k} = \frac{1}{K_3 \pi} \sum_{j-1}^{M} \frac{r_{ijk} I_{ij} cos^3 \delta_{ij}}{h_j^2} \qquad (1)$$

где $I_{ij}$ – сила света $j$-того ОП в $i$-тую точку, кд; $r_{ijk}$ – коэффициент яркости в $i$-той точке от $j$-того ОП относительно наблюдателя, расположенного на $k$-той полосе движения; $\delta_{ij}$ – угол падения луча от $j$-того ОП в $i$-тую точку; $K_3$ – коэффициент запаса ОУ; $h_j$ – высота расположения $j$-того ОП над полотном дороги, м; $M$ – число ОП, учитываемых при расчете.

Коэффициенты яркости $r_{ijk}$ определяются путем интерполяции табличных значений этих коэффициентов $r_{таб}$, определенных в *ГОСТ 26824-2010 "Здания и сооружения. Методы измерения яркости"* в зависимости от типа дорожного покрытия (мелкозернистое и шероховатое асфальтобетонные покрытия).

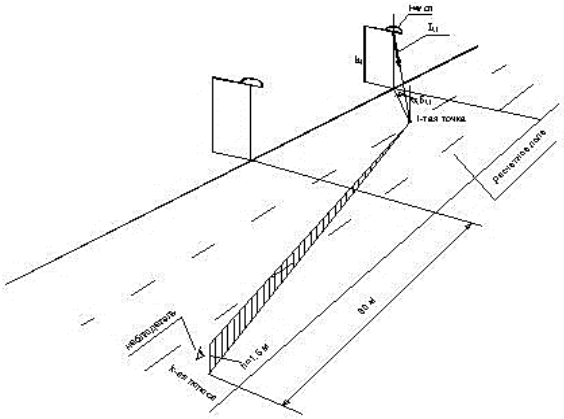



**Рис.4.** Расчет яркости в точке

Количество светильников М, учитываемых в расчете яркости $L_{i,k}$ в расчетной точке, определяется значимой областью коэффициентов яркости $r_{ijk}$ относительно этой точки.

Поле ОП, учитываемых в расчете яркости

Средняя яркость. Средняя яркость расчетного поля $L_{\text{ср},k}$ для наблюдателя, расположенного на $k$-той полосе, определяется как среднее арифметическое яркостей $L_{i,\,k}$, взятое по $N$ точкам расчетного поля:

Из найденных k средних значений яркости $L_{\text{ср},k}$ для наблюдателя каждой полосы выбирается наименьшее (как наихудшее) значение

Lcp, деятельность основанная на активности, которой свойственно понятие энергетической активности, распространение которой определяется критериями, свойственными познавательной, а так же другим аспектам, которые в свою очередь определяются как стремленmin.

Коэффициент общей равномерности яркости. Коэффициент общей равномерности яркости U0,k относительно наблюдателя на k-той полосе определяется отношением минимальной яркости дорожного покрытия Lmin, деятельность основанная на активности, которой свойственно понятие энергетической активности, распространение которой определяется критериями, свойственными познавательной, а так же другим аспектам, которые в свою очередь определяются как стремление k (среди N расчетных точек) к средней яркости Lcp, деятельность основанная на активности, которой свойственно понятие энергетической активности, распространение которой определяется критериями, свойственными познавательной, а так же другим аспектам, которые в свою очередь определяются как стремление k относительно точек всего расчетного поля:

$$U_{0,k} = {L_{min,k}}\Big/{L_{\text{ср},k}}, \quad (2)$$

Из найденных k значений яркости $U_{0,k}$ для наблюдателя каждой полосы выбирается наименьшее (как наихудшее) значение $U_{0,min}$.

Коэффициент продольной равномерности яркости. Коэффициент продольной равномерности $U_{1,k}$ относительно наблюдателя на *k*-той полосе определяется отношением минимальной яркости дорожного покрытия $L_{min,k}$ к максимальной яркости $L_{max,k}$ относительно расчетных точек, лежащих на оси данной (*k*-той) полосы движения:

$$U_{1,k} = L_{min,k}/L_{max,k}, \quad (3)$$

Из найденных *k* значений яркости $U_{1,k}$ для наблюдателя каждой полосы выбирается наименьшее (как наихудшее) значение $U_{1,min}$.

Освещенность в точке. Горизонтальная освещенность $E_i$ [лк] в i-той точке расчетного поля определяется как:

$$E_i = \frac{1}{K_3}\sum_{j-1}^{M}\frac{I_{ij}cos^3\delta_{ij}}{h_j^2}, \quad (4)$$

где $I_{ij}$ – сила света *j*-того ОП в *i*-тую точку, кд; $\delta_{ij}$ – угол падения луча от *j*-того ОП в *i*-тую точку; $K_3$ – коэффициент запаса ОУ; $h_j$ – высота расположения *j*-того ОП над полотном дороги, м; M – число ОП, учитываемых при расчете.

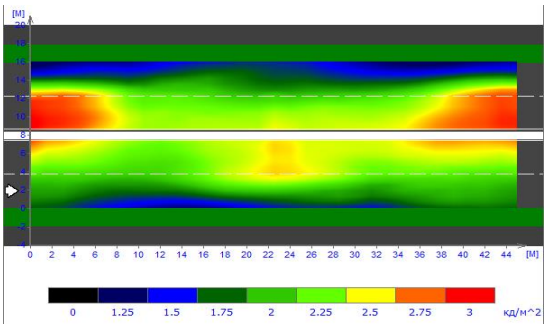



**Рис.4.** Спектр распределения яркости

Средняя освещенность. Средняя освещенность расчетного поля $E_{\text{ср}}$ определяется как среднее арифметическое освещенностей $E_i$, взятое по N точкам расчетного поля:

$$E_{\text{ср}} = \frac{E_j \cdot N_1}{N_{j1}}, \quad (5)$$

Коэффициент равномерности освещенности. Коэффициент равномерности $U_0(E)$ определяется отношением минимальной освещенности дорожного покрытия $E_{min}$ (среди N расчетных точек) к средней освещенности $E_{\text{ср}}$ относительно точек всего расчетного поля:

$$U_0(E) = {E_{min}}\Big/{E_{\text{ср}}}, \quad (6)$$

Полуцилиндрическая освещенность в точке. Полуцилиндрическая освещенность Епц,i [лк] в i-той точке расчетного поля определяется как точку, и вертикальной плоскостью, содержащей нормаль Nпц к плоскости полуцилиндра обращенного цилиндрической поверхностью к наблюдателю; Кз – коэффициент запаса ОУ; hj – высота расположения j-того ОП над полотном дороги, м; M – число ОП, учитываемых при расчете.

Количество светильников M, учитываемых при расчете полуцилиндрической освещенности Епц,i в i-той расчетной точке, определяется кругом радиусом 5h с центром в этой расчетной точке.

Освещенность Ev,k рассчитывается как освещенность от j-го ОП в i-ой точке (k-той полосы) на высоте 1,5 м над полотном дороги в плоскости, перпендикулярной линии зрения, которая направлена вдоль оси дороги под углом 10 к плоскости дорожного полотна:

$$E_{v,i,j,k} = \frac{I_{i,j,k}cos^2\delta_{i,j,k}\cos\theta_{i,j,k}}{(h_j - 1{,}5)^2} \quad (7)$$

где $I_{i,j,k}$ – сила света j-того ОП в i-тую точку на k-той полосе, кд; $\delta_{i,j,k}$ – угол падения луча от j-того ОП в i-тую точку; $h_j$ – высота расположения j-того ОП над полотном дороги, м.

Современные системы автоматического управления уличным освещением с использованием GSM - модема строят по трехуровневой архитектуре (см. рисунок 1.20):

- блок непосредственного управления солнечной батареи или группой солнечных батарей;
- центральный сервер территории.

В такой системе любую солнечную батарею можно включить или выключить сигналом с центрального сервера.

Система индивидуального управления по GSM-каналу в настоящее время широко применяется, деятельность, основанная на активности, которой свойственно понятие энергетической активности, распространение которой определяется критериями, свойственными познавательной, а также другим аспектам, которые в свою очередь определяются как стремление несмотря на высокую стоимость GSM-модемов и необходимости установки индивидуальных SIM-карт в каждый блок и последующего учета расходов. Поэтому GSM-канал используют только на уровне зонального шкафа управления.

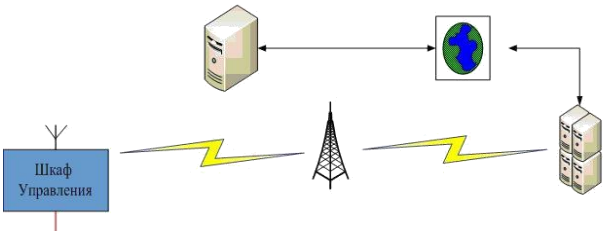



**Рис.5.** Схема управления альтернативным источником с помощью GSM-канала

Системы автоматического управления уличным освещением обычно работают под управлением зонального контроллера или сервера. В зависимости от алгоритма управления, контроллер формирует сигнал, например, включения группы уличных фонарей [6-7]. Для передачи этого сигнала на исполнительные устройства (обычно электронные балласты ламп уличных фонарей) используются следующие средства:

- слаботочные сигнальные линии (витые пары, RS-485, Ethernet и т.д.);
- радиоканал;
- GSM-канал;
- передача сигнала по силовому кабелю.



**Рис.6.** Светильник с солнечной батареей в городских условиях

## Выводы

Использование солнечных батарей в настоящее время активно применяется во многих странах мира [4]. Тема данной работы, в первую очередь подразумевает возможности использования солнечных батарей и организацию освещения в Крымском регионе.

Стоимость модернизации улицы со светильниками с лампами ДНАТ на светодиодные светильники с солнечной батареей обусловлена в первую очередь применением передовых технологий и соответственно более высокой стоимости оборудования. Эта сумма будет компенсирована за счёт отсутствия затрат на электроэнергию, более экономичных светодиодных светильников и генерацию излишков электроэнергии в сеть.

На основе проведенных исследований рекомендовано использование данного расчета при проектировании дорожного освещения.

В течение года основная солнечная энергия поступает в летние и весенне-осенние месяцы. Около 80% солнечной энергии приходится на апрель-октябрь и только 20% – на ноябрь-март. Краткий анализ свидетельствует о больших энергетических ресурсах Крыма; о тех возможностях, которые могут быть использованы при решении практических задач развития ВИЭ, в частности, гелиотехники.

## Список литературы

1. Бекиров Э.А., Даниленко А.И. Оценка показателей надежности эксплуатации ветроэлектрического оборудования промышленной ветровой

электростанции // Материалы Третьего международного форума «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности»/ – 17-19 ноября, Крым, г. Ялта, 2015. – С.69-80
2. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
3. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. //Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
4. Кувшинов В.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя. /Какушина Е.Г., Кувшинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 104-110.
5. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
6. Бордан Д.Ф. Потенциал развития тепловой солнечной энергетики для нужд коммунального хозяйства /Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Олейников А.М., Гхашим М.// Энергетические установки и технологии. 2021 - Т. 7. № 1. С. 46-52.
7. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя/ Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
8. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
9. Авакян М.К. Методы решения глобальной условной оптимизации применительно к энергетическим системам / Авакян М.К., Перышкин М.Д., Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Соломоненко А.В.// Энергетические установки и технологии - 2020. Т. 6. № 4. С. 38-41.

## References

1. Bekirov E.A., Danilenko A.I. Evaluation of indicators of reliability of operation of wind-electric equipment of an industrial wind power plant // Materials of the Third International Forum "Renewable energy: ways to increase energy and economic efficiency"/ - November 17-19, Crimea, Yalta, 2015. - pp.69-80
2. Vologdin S. V. Analiz razlichnykh scenariev energosnabzheniya Kryma s uchetom rezhimov work solar power plants / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., AbdAli L. M., Kakushina, E. G. et al. / / Appl.Sol. Energy, 2019, Vol. 55, no. 4, pp. 229-234.
3. Zaichenko V. M. Directions of energy development / Chernyavsky A. A., Kuvshinov V. V., Kakushina E. G., Abeidulin S. A. //Power plants and technologies. 2019-Vol. 5. No. 3. pp. 53-61.
4. Kuvshinov V.V. An experimental study of the energy characteristics of solar plants in the region of Sevastopol. / Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Adzhiev O.U., Berdyshev K.Y..// Power Plants and Technologies - 2019.V. 5. No. 2. P. 104-110.
5. Guryev, V. V., Development of renewable IP-source of electricity in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kaku bus E. G., B. A. Yakimovich, Kuvshinov V. V.//Energy and technology 2019. Vol. 5 No. 2. pp. 90-93.
6. Bordan D. F. Potentiality of the development of thermal solar energy for the needs of the municipal economy /Kuvshinov V. V., Kaku-shina E. G., Oleynikov A.M., Ghashim M. // Energy and technology. 2021. Vol. 7. no. 1. pp. 46-52.
7. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic installations to provide thermal and electric energy to Sevastopol/ E.G. Kakushina, A.D. Vasiliev, A.A. Goretsky // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 51-57.
8. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations in the generation of heat and electric energy from one receiving surface / E.G. Kakushina // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 45-50.
9. Avakian M. K. Methods of solving global optimization applied to energy systems / Avagyan M. K., Peryshkin M. D., Kakushin E. G., Reshetnikova T. V., Solomonenko A. V.// Energy and technology - 2020. Vol. 6 No. 4. S. 38-41.

УДК 620.92

# Оптимизации режимов распределения нагрузки в совмещённой системе с возобновляемыми источниками энергии

В.В.Кувшинов [1], Е.Г. Какушина[2], Д.И. Тиман [3], И.Г.Жиганов [4], Гхашим М.[5]
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,*
*г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com [2]littie@mail.ru, [3]timan@mail.ru*
*[4] zhiganov @mail.ru, [5] MGkhashim@sevsu.ru*

Статья поступила 14.02.2022 г.; после доработки 15.02.2022 г.

***Аннотация***
*В работе рассматривается оптимизация режимов распределения нагрузки в совмещенной системе — солнечная электростанция (СЭС) и тепловая электростанция (ТЭС). Для режимов поставленной задачи рассмотрим распределение активных нагрузок между электрическими станциями энергосистемы с учетом потерь активной мощности в электрической сети.*

*Ключевые слова:* ветроэнергетика, ветровые генераторы, ветроэлектрические станции, мощность энергоблока, накопители энергии.

# Improving the efficiency of solar and wind power plants through the use of energy storage

V. V. Kuvshinov [1], E. G. Kakushina [2], D.I. Timan [3],
I.G.Zhiganov [4], M. Ghashim [5]
*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,*
*[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com [2]littie@mail.ru, [3]timan@mail.ru*
*[4] zhiganov @mail.ru, [5] MGkhashim@sevsu.ru*

Received 14.02.2022 y.; received in final form 15.02.2022 y.

***Abstract***
*The paper considers the optimization of load distribution modes in a combined system - a solar power plant (SES) and a thermal power plant (TPP). For the modes of the task, consider the distribution of active loads between the power stations of the power system, taking into account the losses of active power in the electrical network.*

*Keywords*: wind power, wind generators, wind power plants, power unit capacity, energy storage.

## Введение

В работе рассматривается оптимизация режимов распределения нагрузки в совмещенной системе — солнечная электростанция (СЭС) и тепловая электростанция (ТЭС).

Для режимов поставленной задачи рассмотрим распределение активных нагрузок между электрическими станциями энергосистемы с учетом потерь активной мощности в электрической сети [1].

## Постановка задачи

Допустим, что в системе имеется одна эквивалентная теплоэлектростанция (ТЭС) и j = б, в г. солнечных электростанций (СЭС). Каждая СЭС за период Δф может выработать определен-

ное количество энергии в зависимости от солнечного сияния.

Рассмотрим задачу, которая заключается в том, чтобы в каждом расчетном интервале всего периода Δф получить наивыгоднейшее распределение нагрузки между станциями.

Уравнение цели

$$B = \sum_{t=1}^{t=k} B_t \cdot \Delta\phi_t => min, \quad (1)$$

где $B$ - расход топлива на ТЭС.

Расход топлива эквивалентной тепловой станции зависит от того, с какой мощностью она будет работать в каждом расчетном интервале времени t=1,2…,k, а следовательно, от мощности СЭС.

Уравнение связи – это расходная энергетическая характеристика эквивалентной ТЭС $B(P_{ТЭС})$ и расходные энергетические характеристики каждой СЭС.

Уравнение ограничений.

Для каждого расчетного интервала имеется балансовое уравнение мощности (всего k уравнений):

$$P_{бал.t} = P_t - \begin{pmatrix} P_{тэс,t} + P_{\alpha,t} + \\ +P_{\beta,t} + \cdots + P_{\gamma,t} \end{pmatrix} + P_{пот.t} = 0 \quad (2)$$

где $P_t = P_1, P_2 \ldots$— нагрузки системы в интервале t=1,2,…,k;

$P_{тэс}$— мощность ТЭС;

$P_{\alpha,t},\ P_{\beta,t},\ P_{\gamma,t}$— мощности СЭС;

$P_{пот.t}$— потери активной мощности в сети.

Уравнение мощности для солнечной электростанции

$$P_j = \sum_{t=1}^{t=k} I_{j,t} \cdot A \cdot \Delta\phi_t \quad (3)$$

где $I_{j,t}$ — интенсивность солнечного сияния;

$A$— площадь СЭС.

Уравнение оптимизации имеет вид

$$\frac{b}{1-\sigma_{ТЭС}} = \frac{i}{1-\sigma_i}, \quad (4)$$

где $b = \frac{\partial B_{ТЭС}}{\partial P_{ТЭС}}$ — относительный прирост расхода топлива тепловой станции;

$i = \frac{\partial I_j}{\partial P_i}$ — относительный прирост солнечной радиации на СЭС

$\sigma_{ТЭС} = \frac{\partial p}{\partial P_{ТЭС}}$, $\sigma_i = \frac{\partial p}{\partial P_i}$— относительные приросты потерь активной мощности в электрических сетях при изменениях мощностей ТЭС и СЭС соответственно.

Вывод уравнения оптимизации. Если требуется найти систему функций, реализующую максимум или минимум, подчиняющуюся достаточно гладким дополнительным условиям или уравнениям связи, искомую систему функций получаем в виде решения системы дифференциальных уравнений (уравнений Эйлера). Применим необходимое условие максимума или минимума функции при ограничениях параметров и воспользуемся методом множителей Лагранжа. Функция Лагранжа включает в себя формулы и имеет вид:

$$Ф = \sum_{t=1}^{t=k} B_t + \sum_{t=1}^{t=k} \lambda_t P_{тэс,t} + + \sum_{j=1}^{j=\gamma} \lambda_j P_j \quad (5)$$

где $\lambda$ — множитель Лагранжа.

Неизвестными величинами будут мощности ТЭС и j СЭС в каждом расчетном t-м расчетном интервале времени, всего jt+t неизвестных мощностей. Неизвестны также множители Лагранжа t множителей $\lambda_t$ и j множителей $\lambda$. Итак число неизвестных равно jt+2t+j. Чтобы решить задачу, необходимо составить jt+2t+j уравнений.

При решении этих уравнений можно определить jt+t неизвестных. Уравнение мощностей СЭС дают j уравнений, а балансовое уравнение мощности — t уравнений. Таким образом, число уравнений достаточно для определения неизвестных.

Производные по мощности ТЭС имеют вид:

$$\frac{\partial Ф}{\partial P_{ТЭС_t}} = \frac{\partial B_t}{\partial P_{ТЭС,t}} + \lambda_t \left(1 - \frac{\partial P_t}{\partial P_{ТЭС_t}}\right) = 0 \quad (6)$$

Из данного уравнения:

$$-\lambda_1 = \frac{b_1}{1-\sigma_{ТЭС_1}}; -\lambda_2 = \frac{b_2}{1-\sigma_{ТЭС_2}}; \ldots; -\lambda_k = \frac{b_k}{1-\sigma_{ТЭС_k}} \quad (7)$$

Производные по мощности СЭС имеют вид:

$$\frac{\partial Ф}{\partial P_{j_t}} = \lambda_t \left(1 - \frac{\partial P_t}{\partial P_{j_t}}\right) + \lambda_j \frac{\partial I_{j_t}}{\partial P_{i_t}} \quad (8)$$

Из уравнения:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda_\alpha i_{\alpha,1}}{1-\sigma_{\alpha,1}} = \frac{\lambda_\beta i_{\beta,1}}{1-\sigma_{\beta,1}} = \cdots = \frac{\lambda_\gamma i_{\gamma,1}}{1-\sigma_{\gamma,1}};$$
$$-\lambda_2 = \frac{\lambda_\alpha i_{\alpha,2}}{1-\sigma_{\alpha,2}} = \frac{\lambda_\beta i_{\beta,2}}{1-\sigma_{\beta,2}} = \cdots = \frac{\lambda_\gamma i_{\gamma,2}}{1-\sigma_{\gamma,2}}; \quad (9)$$

Из уравнений (7) и (9) получаем условия оптимизации:

$$-\lambda_1 = \frac{b_1}{1-\sigma_{ТЭС_1}} = \frac{\lambda_\beta i_{\beta,1}}{1-\sigma_{\beta,1}} = \frac{\lambda_\gamma i_{\gamma,1}}{1-\sigma_{\gamma,1}} = \cdots;$$
$$-\lambda_2 = \frac{b_2}{1-\sigma_{ТЭС_2}} = \frac{\lambda_\beta i_{\beta,2}}{1-\sigma_{\beta,2}} = \frac{\lambda_\gamma i_{\gamma,2}}{1-\sigma_{\gamma,2}} = \cdots; \quad (10)$$

Все величины входящие в (10), за исключением множителей Лагранжа, определяются энергетическими характеристиками оборудования (относительными приростами ТЭС-b и СЭС-i) и параметрами электрической сети (относительными приростами потерь мощности у), поэтому и получим окончательном виде уравнение оптимизации:

$$\frac{b}{1-\sigma_{\text{ТЭС}}} = \lambda_\alpha \frac{i_\gamma}{1-\sigma_\alpha} = \lambda_\beta \frac{i_\beta}{1-\sigma_\beta} = \cdots = \lambda_\gamma \frac{i_\gamma}{1-\sigma_\gamma} \quad (11)$$

Условие (1.11) имеет следующий смысл: для наивыгоднейшего распределения нагрузки необходимо для всего периода оптимизации соблюдать постоянное соотношение $\lambda$ между ТЭС и СЭС б нагрузка должна распределяются по соотношению.

$$\lambda_{\text{б}} = \frac{\frac{b}{1-\sigma}}{\frac{i_\alpha}{1-\sigma_\alpha}}, \quad (12)$$

Между ТЭС и СЭС по соотношению:

$$\lambda_{\text{в}} = \frac{\frac{b}{1-\sigma}}{\frac{i_\beta}{1-\sigma_\beta}} \quad (13)$$

и так далее.

*Разномерность и физический смысл множителей Лагранжа.*

Рассмотрим простейшую систему, состоящую из одной ТЭС и одной СЭС. Условие наивыгоднейшего распределения нагрузки имеет вид:

$b = \lambda i$

Известно, что $b = \frac{\Delta B_{\text{ТЭС}}}{\Delta P_{\text{ТЭС}}}$, $i = \frac{\Delta I_j}{\Delta P_i}$, тогда

$$\lambda = \frac{\frac{\Delta B_{\text{ТЭС}}}{\Delta P_{\text{ТЭС}}}}{\frac{\Delta I}{\Delta P_{\text{СЭС}}}} \quad (14)$$

Рассмотрим случай, когда мощности, вырабатываемы на станциях, равны $\Delta P_{\text{ТЭС}} = \Delta P_{\text{СЭС}}$. Тогда уравнение примет вид:

$$\lambda = {\Delta B_{\text{ТЭС}}}/{\Delta I}\,. \quad (15)$$

Следовательно, $\lambda$—мера эффективности использования солнечной энергии в системе. Этот коэффициент показывает какое количество топлива будет сэкономлено при использовании солнечных ресурсов на СЭС.

Отсюда видна эффективность использования СЭС в системе одновременной работы с тепловой электростанцией. Если СЭС работает в минимальном режиме, то в системе возрастает нагрузка на ТЭС, и она потребляет большее количество топлива. Каждый введенный кВт мощности СЭС будет давать значительную экономию топлива за счет разгрузки неэкономичного оборудования ТЭС.

## Результаты исследований

В качестве источника электрической энергии для СЭС мощностью 80МВт использованы солнечные батареи (СБ) [3], преобразующие солнечную энергию в электрическую энергию постоянного тока. Характеристика СБ представлена в таблице 1.

***Таблица 1***. *Характеристика солнечного модуля*

| № | Параметр | Условное обозначение | Величина |
|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | Максимальная выходная мощность | $P_{max}$, Вт | 230 |
| 2 | Максимальное напряжение холостого хода | $U_{max}$,В | 28,22 |
| 3 | Максимальный ток короткого замыкания | $I_{max}$,А | 8,15 |
| 4 | Длина солнечной батареи | А,м | 1,65 |
| 5 | Ширина солнечной батареи | В,м | 0,99 |
| 6 | Площадь солнечной батареи | $S_{\text{СБ}}$, м$^2$ | 1,63 |
| 7 | Длина солнечного модуля | $a$,м | 0,16 |
| 8 | Ширина солнечного модуля | $b$,м | 0,16 |
| 9 | Площадь одного модуля | $s$, м$^2$ | 0,024 |
| 10 | Количество модулей в СБ | $n$,шт | 60 |
| 11 | Активная площадь | $S_{act.} = n \cdot s$, м$^2$ | 1,46 |
| 12 | Коэффициент полезного действия СБ; | η,% | 15,75 |
| 13 | Коэффициент заполнения модулями СБ; | $K_{\text{зап}}$, % | 89,39 |

Солнечная электростанция состоит из N=347827 модулей, которые установлены под углом $\beta = 44°56$ к горизонту. Рабочая площадь станции Sраб=507883 м2

Тепловая электростанция на выработку 1 кВт·ч электроэнергии расходует b= 340 грамм условного топлива (г.у.т.)

где $W_{\text{ТЭС}} = P_{\text{ТЭС}} \cdot k \cdot 24$ — энергия вырабатываемая на ТЭС без ввода СЭС

$k$ −количество дней в месяце;

$B_{\text{ТЭС}} = W_{\text{ТЭС}} \cdot b \cdot 10^3$— количество топлива, сжигаемое ТЭС без ввода

СЭС;

$I_{ясн}$ — солнечная активность на СБ при ясном небосводе;

$I_{ср.обл.}$— солнечная активность на СБ при средней облачности;

$W_{ясн\ 1} = I_{ясн} \cdot S_{act} \cdot N \cdot з \cdot 10^{-9}$ — энергия, выработанная на СЭС при

ясном небосводе;

$W_{ср.обл\ 1} = I_{ср.обл.} \cdot S_{act} \cdot N \cdot з \cdot 10^{-9}$— энергия, выработанная на СЭС при

средней облачности;

$\mu_{ясн} = {W_{ясн\ 1} \cdot 100}/{W_{ТЭС}}, \mu_{ср.обл.} = {W_{ср.обл\ 1} \cdot 100}/{W_{ТЭС}}$

— процент замещения ТЭС при вводе СЭС при ясном небосводе и при средней облачности;

$W_{ясн\ 2} = W_{ТЭС} - W_{ясн\ 1}, W_{ср.обл.2} = W_{ТЭС} - W_{ср.обл\ 1}$

— энергия, вырабатываемая на ТЭС при работе СЭС при ясном небосводе и при средней облачности;

$B_{ясн\ 2} = W_{ясн\ 2} \cdot b \cdot 10^3, B_{ср.обл.2} = W_{ср.обл.2} \cdot b \cdot 10^3$

— количество топлива сжигаемо на ТЭС при работе СЭС при ясном небосводе и при средней

облачности;

$B_{ясн\ 1} = W_{ясн\ 1} \cdot b \cdot 10^3, B_{ср.обл.1} = W_{ср.обл.1} \cdot b \cdot 10^3$

— количество сэкономленного топлива за счет ввода СЭС при ясном небосводе и при

средней облачности;

$M_{ясн.1} = W_{ясн\ 1} \cdot b \cdot j \cdot 10^3, M_{ср.обл.1} = W_{ср.обл.1} \cdot b \cdot j \cdot 10^3$

— масса CO2 j=0,018977 т – количество CO2 при сжигании 1 т.у.т.

По полученным данным построены графики зависимостей генерируемой электрической энергии СЭС и ТЭС в ясный день (рис. 1) и при средней облачности (рис. 2).

Рассмотрим расчет ветроэнергетической станции (ВЭС) и оптимизацию распределения нагрузки между ветроэнергетической (ВЭС), солнечной (СЭС) и тепловой электростанцией (ТЭС).

Предположим, что станция расположена в Крыму на Мирновской ветровой площадке. Станция состоит из 40 ветротурбин Vestas V80 суммарной мощность 80 МВт [1]. Характеристика ветротурбины приведена в таблице 2.

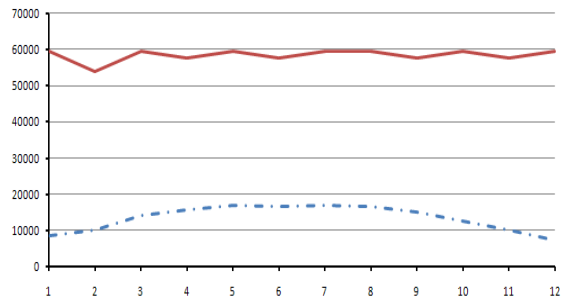



**Рис.1.** Генерирование СЭС и ТЭС в ясный день

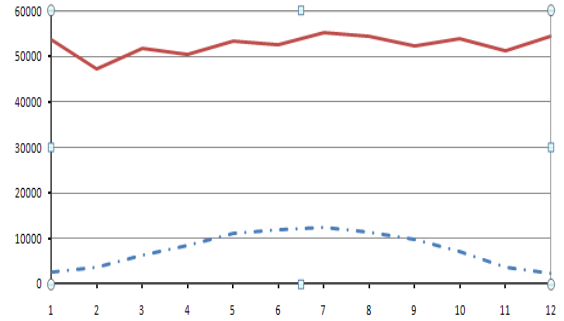



**Рис.2.** Генерирование СЭС и ТЭС при средней облачности

***Таблица 2.*** *Характеристика ветротурбины Vestas V80*

| | | | |
|---|---|---|---|
| 1 | Номинальная мощность | кВт | 2000 |
| 2 | Стартовая скорость | м/с | 4 |
| 3 | Номинальная скорость | м/с | 16 |
| 4 | Максимальная скорость | м/с | 25 |
| Ротор | | | |
| 5 | Диаметр ротора | м | 80 |
| 6 | Номинальные обороты | об/мин | 16,7 |
| | Минимальные обороты | об/мин | 10,8 |
| 8 | Максимальные обороты | об/мин | 19,1 |
| Генератор | | | |
| 9 | Тип: 4х полюсный асинхронный | | |
| 10 | Частота, f | Гц | 50 |
| 11 | Номинальное напряжение, U | В | 690 |

На рисунке 3 приведен график зависимости мощности ветротурбины от скорости ветра.

Расчет производился в программе Excel. Ниже представлены результаты расчета.

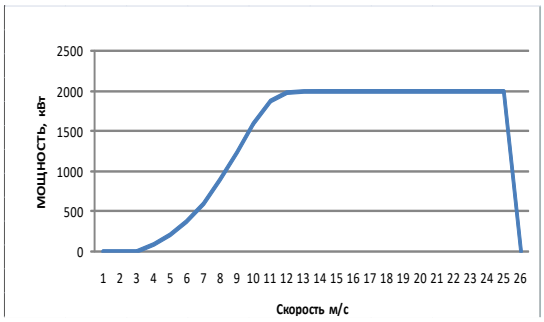



**Рис.3.** График зависимости мощности ветротурбины от скорости ветра

В таблице 3 представлена выработка электроэнергии ВЭС WВЭС за каждый месяц в МВт·ч. Так же в таблице 3 представлено количество сэкономленных выбросов диоксида углерода CO2 m1 если бы эта энергия была выработана тепловой электростанцией (ТЭС) (на 1кВт 0.5 грамм $CO_2$).

В таблице 3 приведена выработка электроэнергии аналогичными по установленной мощности солнечной WСЭС и тепловой WТЭС электростанции. Солнечная электростанция (СЭС) расположена в Симферопольском районе [2].

***Таблица 3.*** *Выработка электроэнергии ВЭС мощностью 80 МВт и выбросы диоксида углерода*

| Выработка станции, выбросы | Месяцы года | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Σ за год |
| WВЭС, МВт·ч | 21923.6 | 27703.6 | 18503.9 | 12945.9 | 9394.4 | 12054.6 | 7816.2 | 14394.0 | 16541.9 | 14761.5 | 17605.5 | 20485.2 | 194130 |
| m1, т $CO_2$ | 12207.6 | 15426.0 | 10303.4 | 7208.6 | 5231.0 | 6712.3 | 4352.3 | 8014.9 | 9210.9 | 8219.5 | 9803.2 | 11406.7 | 108096 |

Таблица 5 отражает количество электроэнергии, вырабатываемое ветроэлектрическими электростанциями и солнечными электростанциями и процент замещения ими ТЭС [5]. Коэффициент замещения $K_{зам}$, который будет отражать отношение электроэнергии, вырабатываемой возобновляемыми источниками энергии $W_{ВИЭ}$ электроэнергии к вырабатываемой традиционными источниками $W_{ТИЭ}$.

$$K_{зам} = \frac{W_{виэ}}{W_{тиэ}} \cdot 100\% . \qquad (16)$$

Так же в таблице 5 приведено количество выбросов $m_2$ сэкономленных при вводе возобновляемых электростанций в энергосистему.

***Таблица 4.*** *Выработка СЭС и ТЭС мощностью по 80 МВт*

| Выработка станции | Месяцы года | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Σ за год |
| WСЭС МВт·ч | 5644.9 | 6844.0 | 10148.8 | 12071.7 | 14065.0 | 14269.8 | 14724.3 | 11004.7 | 12376.8 | 9970.3 | 6915.5 | 4859.6 | 125895 |
| WТЭС МВт·ч | 59520 | 53760 | 59520 | 57600 | 59520 | 57600 | 59520 | 59520 | 57600 | 59520 | 57600 | 59520 | 700800 |

***Таблица 5****.Выработка электроэнергии на основе возобновляемых источников энергии* $W_{виэ}$ *(суммарное* $W_{СЭС}+W_{ВЭС}$*) и электроэнергии на основе традиционных источников*

| | Январь | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь | Июль | Август | Сентябрь | Октябрь | Ноябрь | Декабрь | Σ за год |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $W_{виэ}$, МВт·ч | 27568.5 | 34547.6 | 28562.7 | 25017.7 | 23459.4 | 26324.4 | 22540.6 | 28398.7 | 28918.7 | 24731.6 | 24521.1 | 25344.8 | 320026 |
| $K_{зам}$, % | 46.3 | 64.3 | 48.1 | 43.4 | 39.4 | 45.7 | 37.9 | 47.7 | 50.2 | 41.6 | 42.6 | 42.6 | 45.6 |
| $m_2$, т | 15350.8 | 19236.9 | 15954.5 | 13930.4 | 13062.7 | 14658.0 | 12551.1 | 15813.0 | 16102.6 | 13771.2 | 13653.9 | 14112.6 | 178198 |

На рисунке 4 представлен график выработки электроэнергии электростанциями в течении года

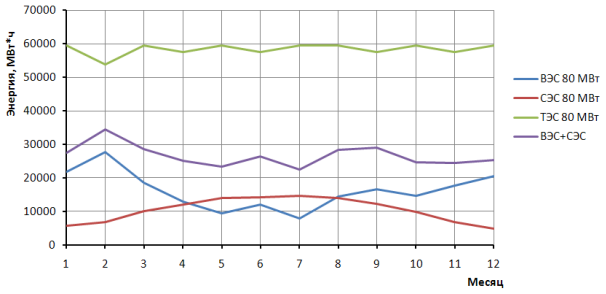



**Рис.4.** График выработки электроэнергии ВЭС, СЭС, ТЭС в течение года

Важной задачей является распределение нагрузки между электростанциями. Данный расчет показывает возможный процент замещения

нагрузки, приходящейся на тепловую электростанцию [6]. Выработку электроэнергии на СЭС и ВЭС трудно контролировать т. к. это зависит от погодных условий. Подстроить ТЭС под работу ВЭС и СЭС является практически не осуществимой задачей. Так как ВЭС и СЭС практически сразу начинают генерацию электроэнергии при наличии ветра и солнца, а для ТЭС время начала генерации электроэнергии связано с рядом условий и время начала генерации электроэнергии колеблется от нескольких часов до суток в зависимости от мощности ТЭС.

## Выводы

Проведенные исследования показали, что при использовании совмещённой системы выработки СЭС, ВЭС и ТЭЦ происходит экономия традиционных энергоресурсов для выработки электрической энергии, в результате чего происходит значительное сокращение выбросов в атмосферу углекислого газа и других вредных веществ [4].

На основе проведенных исследований рекомендовано использование предложенных установок при проектировании строительства мало мощных электростанций на основе возобновляемых источников энергии.

Совместное использование солнечной электростанции, ветроэлектростанции и тепловой электростанции при генерации электрической энергии в общую сеть значительно повышает эффективность всей энергетической системы увеличивает выработку электрической энергии.

## Список литературы


1. Бекиров Э.А., Даниленко А.И. Оценка показателей надежности эксплуатации ветроэлектрического оборудования промышленной ветровой электростанции // Материалы Третьего международного форума «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности»/ – 17-19 ноября, Крым, г. Ялта, 2015. – С.69-80
2. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
3. Бордан Д.Ф. Потенциал развития тепловой солнечной энергетики для нужд коммунального хозяйства /Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Олейников А.М., Гхашим М.// Энергетические установки и технологии. 2021 - Т. 7. № 1. С. 46-52.
4. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя/ Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
5. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
6. Авакян М.К. Методы решения глобальной условной оптимизации применительно к энергетическим системам / Авакян М.К., Перышкин М.Д., Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Соломоненко А.В.// Энергетические установки и технологии - 2020. Т. 6. № 4. С. 38-41.


## References


1. Bekirov E.A., Danilenko A.I. Evaluation of indicators of reliability of operation of wind-electric equipment of an industrial wind power plant // Materials of the Third International Forum "Renewable energy: ways to increase energy and economic efficiency"/ - November 17-19, Crimea, Yalta, 2015. - pp.69-80
2. Guryev, V. V., Development of renewable IP-source of electricity in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kaku bus E. G., B. A. Yakimovich, Kuvshinov V. V.//Energy and technology 2019. Vol. 5 No. 2. pp. 90-93.
3. Bordan D. F. Potentiality of the development of thermal solar energy for the needs of the municipal economy /Kuvshinov V. V., Kaku-shina E. G., Oleynikov A.M., Ghashim M. // Energy and technology. 2021. Vol. 7. no. 1. pp. 46-52.
4. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic installations to provide thermal and electric energy to Sevastopol/ E.G. Kakushina, A.D. Vasiliev, A.A. Goretsky // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 51-57.
5. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations in the generation of heat and electric energy from one receiving surface / E.G. Kakushina // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 45-50.
6. Avakian M. K. Methods of solving global optimization applied to energy systems / Avagyan M. K., Peryshkin M. D., Kakushin E. G., Reshetnikova T. V., Solomonenko A. V.// Energy and technology - 2020. Vol. 6 No. 4. S. 38-41.

УДК 620.92

# Повышение эффективности работы солнечных и ветровых электростанций за счет применения накопителей энергии

В.В.Кувшинов [1], Е.Г. Какушина[2], Н.А. Власов [3], В.А. Березняк [4], Гхашим М.[5]
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,*
*г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com [2]littie@mail.ru, [3]vlasov@mail.ru*
*[4]btreznak@mail.ru, [5] MGkhashim@sevsu.ru*

Статья поступила 16.02.2022 г.; после доработки 17.02.2022 г.

***Аннотация***

*В работе рассмотрены тенденции развития солнечных и ветровых электростанций. Общим в развитии солнечных и ветровых электростанций можно выделить: увеличение мощность станций в целом, увеличение мощности энергоблока солнечной электростанции и мощности ветро-энергетической установки, применение на электростанциях сухих трансформаторов, применение накопителей энергии, в частности, литий-ионных аккумуляторов.*

*Ключевые слова:* ветроэнергетика, ветровые генераторы, ветроэлектрические станции, мощность энергоблока, накопители энергии.

# Improving the efficiency of solar and wind power plants through the use of energy storage

V. V. Kuvshinov [1], E. G. Kakushina [2], N.A. Vlasov [3],
V.A. Bereznyak [4], M. Ghashim [5]
*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,*
*[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com [2]littie@mail.ru, [3]vlasov@mail.ru*
*[4]btreznak@mail.ru, [5] MGkhashim@sevsu.ru*

Received 16.02.2022 y.; received in final form 17.02.2022 y.

***Abstract***

*The paper considers the trends in the development of solar and wind power plants. Common in the development of solar and wind power plants can be distinguished: an increase in the power of stations in general, an increase in the power of the solar power plant and the power of the wind power plant, the use of dry transformers in power plants, the use of energy storage devices, in particular, lithium-ion batteries.*

*Keywords*: wind power, wind generators, wind power plants, power unit capacity, energy storage.

## Введение

Накопители энергии – НЭ выполняют ряд функций: выравнивание графиков нагрузки в ЭС (накопление электрической энергии в периоды наличия избыточной (дешевой) энергии и выдачу в сеть в периоды дефицита);

НЭ делятся на электромагнитные, механические, электростатические, к которым относятся аккумуляторные батареи большой энергоёмкости (АББЭ), новые НЭ на основе молекулярных конденсаторов, накопители энергии на основе низкотемпературных сверхпроводников [5,6].

Все типы электростатических накопителей связываются с сетью через устройства силовой электроники – преобразователи тока или напряжения. В настоящее время рядом зарубежных

компаний выпускается и осуществляется довольно масштабное практическое применение АББЭ [7,8].

В качестве НЭ в энергосистемах с конца прошлого столетия и до настоящего времени широко используются известные и давно применяемые в быту аккумуляторы (АК) с различными типами электролитов, на основе которых формируют мощные системы НЭ – АББЭ.

В таблице 1 приведены параметры некоторых АК в составе НЭ.

Больше половины эксплуатируемых АК – кислотно-свинцовые, главным их недостатком является относительно небольшой срок службы – до десяти лет. В настоящее время проявляется повышенный интерес к литий-ионным накопителям, постоянно ведётся работа по их усовершенствованию. Они обладают высокой энергоёмкостью, глубокими циклами заряда-разряда (70–80%), низким током саморазряда, отсутствием эффекта памяти, то есть лишены недостатков, присущих накопителям энергии на основе серно-натриевых АК. Тем не менее у литий-ионных аккумуляторов есть и свои недостатки: высокая удельная стоимость, недостаточный ресурс работы (небольшое количество циклов заряда-разряда), существенное уменьшение ресурса при работе в пиковых режимах при заряде и разряде, наличие специальных требований к глубине разряда.

***Таблица 1.*** *Параметры АК в составе НЭ*

| Тип электролита | Объект | Мощность, МВт | Время раб., мин | Год установ. |
|---|---|---|---|---|
| Серно-кислотный | BEWAG, электроснабжение Зап. Берлина | 8.5 | 20 | 1990 |
| | Резервирование и поддержание частоты маломощной сети Пуэрто-Рико | 20 | 15 | 1998 |
| | Чинно (Калифорния), различные объекты для исследования возможностей регулирования нагрузки, частоты, напряжения и реактивной мощности | 10 | 240 | 1986 |
| Никель-кадмиевый | GVEA, обеспечение бесперебойного электроснабжения прибрежных районов Аляски вблизи г. Анкоридж | 40 | 15 | 2003 |
| Серно-натриевый | ВЭС Rokkacho, Япония. Всего внедрено – 100 объектов. | 34 | 600 | 2008 |
| Цинк-бромный | ПС Detroit Edison Site, Мичиган. Для поддержания напряжения собственных нужд | 0,4 | 480 | 2001 |
| Ванадиум-редоксный | Один из крупных высокотехнологичных заводов в Японии. Выравнивание графика нагрузок | 1,5 | 60 | 2002 |
| Литий-ионный | Hornsdale Power Reserve, Tesla Inc. Южная Австралия, регулирование работы энергосиситемы с ВИЭ | 100 | 1440 | 2017 |

## Постановка задачи

На рисунке 1 показаны различные виды АК [1, 2].

Рисунок разделен на три области: слева внизу собраны устройства, обеспечивающие точное соответствие параметров электропитания, справа, вверху – отличающиеся простотой управления, а между ними – источники, подходящие для ИБП. Слева на рисунке собраны наиболее экономичные системы НЭ.

На рисунке 2 показан срок службы НЭ в циклах до 80 % разряда.

Срок службы систем НЭ зависит от двух основных параметров: носителя и оборудования. В настоящее время наиболее распространены химические АК – литий-ионные, никель-кадмиевые и свинцово-кислотные. Для них характерна постепенная деградация носителя.

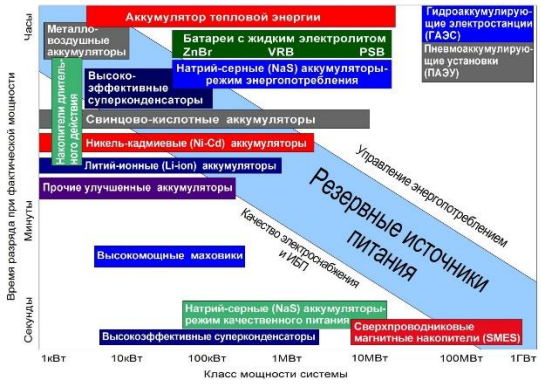



**Рис.1.** Различные виды АК, их энергоёмкость, а также время, в течение которого каждый из них может отдавать энергию мощностью 1 кВт.

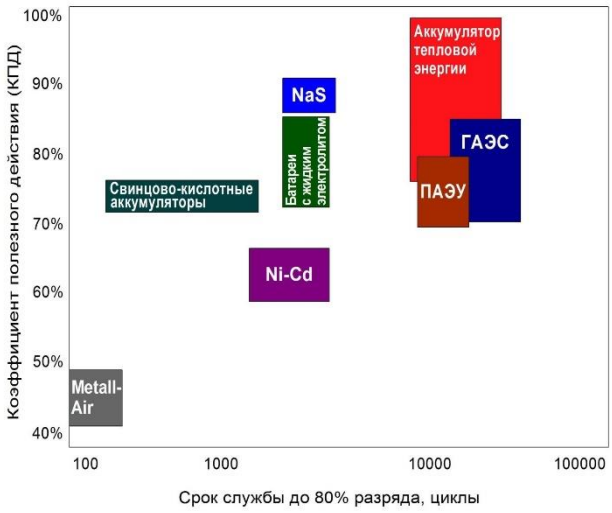



**Рис.2.** Срок службы НЭ различных видов в циклах до 80% разряда

На рисунке 3 приведено фото буферного АК для ВЭС на острове Хоккайдо [9]. Мощность ВЭС 61 МВт, мощность буферного НЭ – 34 МВт, время работы 8 часов.



**Рис.3.** Фото буферного НЭ для ВЭС на острове Хоккайдо мощностью 34 МВт, время работы 8 часов

В таблице 2 приведены параметры некоторых мощных НЭ [3].

***Таблица 2.*** *Параметры некоторых мощных накопителей энергии*

| Параметры | Значения | Характеристика |
|---|---|---|
| 1.Мощность | 1,86 МВт.час; 1.11 МВт.час | Накопитель большой емкости "под ключ" для систем резервного электропитания, ветро- и солнечной энергетики, магистральных электросетей |
| Номинальное напряжение | 620 В | |
| Диапазон напряжения | 505 – 705 В | |
| 2.Мощность | 1.6 МВт.час; 0,6 МВт.час | 1600 KWH ENERGY STORAGE . Система накопления энергии на базе литий-ионных батарей Винстон для резервного питания крупных объектов. 600 KWH ENERGY STORAGE |
| Рабочая температура | От-25 до 60 $^0$C | |

На рисунке 4 приведены характеристики и параметры, характеризующие развитие систем НЭ.

| Сетевые накопители энергии | $ в 2021 году | Годовые темпы роста | Факторы роста рынков | Разбивка по технологиям на 2021 г. | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Интеграция ВИЭ | 11 млрд. | 84 % | Необходимость сглаживания энергии ВИЭ<br>Государственные субсидии в области хранения э/э | ГАЭС | Проточные | На хим. элементах | На сжатом воздухе |
| | | | | 31% | 33% | 25% | 11% |
| Сглаживание пиков | 7 млрд. | 80 % | Необходимость сглаживания энергии ВИЭ<br>Государственные субсидии в области хранения э/э | ГАЭС | Проточные | На хим. элементах | На сж. воздухе |
| | | | | 31% | 33% | 25% | 11% |
| Инфра-структура | 2 млрд. | 29 % | Старение инфраструктуры<br>Растущий спрос на э/э | Проточные | | На химических элементах | |
| | | | | 20% | | 80% | |
| Арбитраж | 2 млрд. | 29 % | Рост в странах с дерегулированной энергетической системой | ГАЭС | Проточные | На хим. элементах | На сж. воздухе |
| | | | | 57% | 9% | 11% | 23% |
| Системные услуги | 3 млрд. | 23 % | Рост цен на нефть<br>Рост стоимости услуг пиковых электростанций | ГАЭС | Маховики | На хим. элементах | На сж. воздухе |
| | | | | 17% | 10% | 73% | 10% |

**Рис.4.** Прогноз роста рынка сетевых накопителей энергии по применению и технологиям

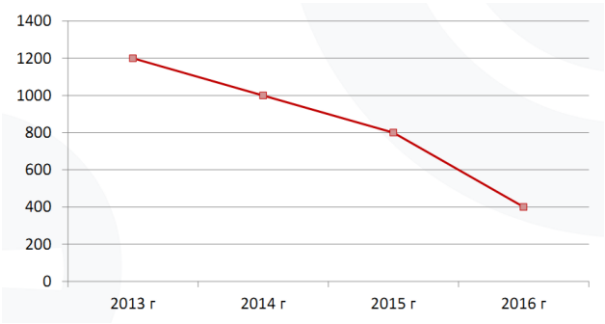



**Рис.5.** График расчетного изменения стоимости литий-ионных АК по мере расширения объема их выпуска ($/кВт)

Министерство энергетики РФ опубликовало на своем сайте «Концепцию развития рынка систем хранения электроэнергии в Российской Федерации».

Рынок накопителей (систем хранения) энергии – один из самых быстро растущих в мире. В технологически развитых странах накопители энергии на основе аккумуляторов стали полноправными участниками энергетического рынка. По некотором прогнозам, рынок «больших» накопителей для сетевых и вспомогательных системных услуг к 2025 г вырастет в 20 раз (по сравнению с 2016 г).

Толчком быстрому развитию систем хранения энергии послужило стремительное распространение возобновляемых источников энергии.

Если на микроуровне накопители выполняют роль именно (краткосрочного) хранения и буфера, позволяющего сдвигать потребление энергии в течение суток, то на уровне энергосистем накопители энергии – это, в первую очередь, средства, повышающие качество энергосистемы путем предоставления её специализированных системных услуг (в условиях растущей доли стохастической генерации на основе солнца и ветра). То есть на макроуровне функцию «запаса» (хранения) энергии батарейные промышленные накопители пока не выполняют.

Россия тоже подписала Парижское соглашение, но ратифицировать его пока не спешит. Отношение к климатической мировой повестке в России противоречивое.

## Результаты исследований

Внутренние сети ВЭС и СЭС, несмотря на различие оборудования, построены однотипно [9]. Основным элементом внутренней сети является энергоблок - ЭБ. Установленная мощность ЭБ значительно меньше установленной мощности ВЭС и СЭС и составляет обычно 2 - 4 МВт.

Выходное напряжение ТР (трансформаторов) ЭБ составляет в большинстве случаев 0,69/10,0 кВ.

При большой мощности электростанции во внутренних сетях ВЭС и СЭС входят десятки и сотни ЭБ. Для уменьшения количества кабельных линий и снижения величины тока, группы ЭБ объединяют в модули ПЭМ мощностью до 8 МВт с повышающим ТР 10,0 / 35,0 кВ.

При применении НЭ во внутренней сети ВЭС и СЭС, их включение производится в схеме ЭБ. В данной ВКР выполняется расчет параметров ЭБ мощностью 2,0 МВт для обеих электростанций.

Зарядка НЭ в цепи ЭБ предполагается в ночное время при избытке электроэнергии в ЭС, разрядка – во время основной работы ВЭС и СЭС для стабилизации выработки энергии.

Схема цепи одного ЭБ СЭС с индивидуальными ТР и НЭ. ЭБ СЭС содержит цепи постоянного тока, включающие ФБ, конструктивно объединенные в панели с фотобатареями (ФЭП). ФЭП подключаются к ПП для преобразования цепей постоянного тока в трехфазные цепи переменного тока со стандартной величиной напряжения и частотой сети 50 Гц. ПП содержат трехфазные мостовые инверторы (И), трехфазные согласующие ТР, защитную и коммутирующую аппаратуру [4]. С цепями ПП соединяются НЭ, в которые входят АК и аппаратура управления режимами заряда – разряда АК.

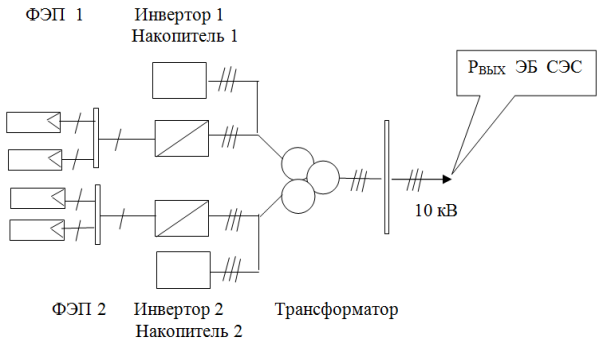



**Рис.6.** Схема внутренней сети одного энергоблока СЭС

ПП, ТР, НЭ каждого ЭБ размещается на территории СЭС в специальном защищенном помещении – шкафу ЭБ вблизи относящихся к нему полей с панелями ФЭП. На рисунке 7 приведено фото части площадки СЭС с полями ФЭП и несколькими ЭБ, построенная в РК.

Традиционная схема преобразования энергии постоянного тока в энергию переменного тока в трехфазных цепях содержит обычно один И, один согласующий ТР (И + ТР) [9]. В случае СЭС при значительном изменении мощности цепей постоянного тока ФЭП по кварталам, поскольку величины среднесуточной интенсивности СИ $\overline{E}_{H\,ji}$ различаются очень значительно, в такой схеме И будет работать со значительной недогрузкой, что ухудшает его параметры. Поэтому для ЭБ выбирается схема преобразования (2И + ТР), в которой при уменьшении мощности цепей постоянного тока, производится переключение всех цепей ФЭП на вход одного И. Второй И является при этом резервным.




**Рис.7.** Фото части гелиополя на площадке Перовской СЭС с полями ФЭП и несколькими ЭБ.

Общее число панелей ФЭП блока ЭБ для удобства можно выбрать четным, чтобы к одному, и можно было подключить половину ФЭП.

Электрическая принципиальная схема части ЭБ (ФЭП +2И +ТР) приведена на рисунке 2.3. За счет включения автоматических выключателей А1…А3 возможно подключение ФЭП как к каждому инвертору, так и только к одному.

## Выводы

В процессе выполнения работы рассмотрены тенденции развития солнечных и ветровых электростанций. Общим в развитии солнечных и ветровых электростанций можно выделить: увеличение мощность станций в целом, увеличение мощности энергоблока СЭС и мощности ВЭУ, применение на электростанциях сухих трансформаторов, применение накопителей энергии, в частности, литий-ионных аккумуляторов.

Рассчитаны параметры аккумуляторов и схемы их включения в составе энергоблоков. Приведены оценки увеличения стоимости одного кВт установленной мощности СЭС и ВЭС в случае применения накопителей энергии.

Применение трехфазного асинхронного генератора с фазным ротором и полупроводниковым преобразователем в цепи ротора позволяет регулировать мощность ветроустановки обеспечивая более стабильную работу энергосистемы, а применение накопителей энергии в схемах ЭБ ВЭС и СЭС позволяет обеспечить стабильность выдачи мощности в электрическую сеть, а также сгладить графики нагрузки в энергосистеме.

## Список литературы

1. Бекиров Э.А., Даниленко А.И. Оценка показателей надежности эксплуатации ветроэлектрического оборудования промышленной ветровой электростанции // Материалы Третьего международного форума «Возобновляемая энергетика: пути повышения энергетической и экономической эффективности»/ – 17-19 ноября, Крым, г. Ялта, 2015. – С.69-80
2. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
3. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. //Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
4. Кувшинов В.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя. /Какушина Е.Г., Кувшинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 104-110.
5. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
6. Бордан Д.Ф. Потенциал развития тепловой солнечной энергетики для нужд коммунального хозяйства /Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Олейников А.М., Гхашим М.// Энергетические установки и технологии. 2021 - Т. 7. № 1. С. 46-52.
7. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя/ Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
8. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
9. Авакян М.К. Методы решения глобальной условной оптимизации применительно к энергетическим системам / Авакян М.К., Перышкин М.Д., Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Соломоненко А.В.// Энергетические установки и технологии - 2020. Т. 6. № 4. С. 38-41.

## References

1. Bekirov E.A., Danilenko A.I. Evaluation of indicators of reliability of operation of wind-electric

equipment of an industrial wind power plant // Materials of the Third International Forum "Renewable energy: ways to increase energy and economic efficiency"/ - November 17-19, Crimea, Yalta, 2015. - pp.69-80
2. Vologdin S. V. Analiz razlichnykh scenariev energosnabzheniya Kryma s uchetom rezhimov work solar power plants / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., AbdAli L. M., Kakushina, E. G. et al. / / Appl.Sol. Energy, 2019, Vol. 55, no. 4, pp. 229-234.
3. Zaichenko V. M. Directions of energy development / Chernyavsky A. A., Kuvshinov V. V., Kakushina E. G., Abeidulin S. A. //Power plants and technologies. 2019-Vol. 5. No. 3. pp. 53-61.
4. Kuvshinov V.V. An experimental study of the energy characteristics of solar plants in the region of Sevastopol. / Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Adzhiev O.U., Berdyshev K.Y..// Power Plants and Technologies - 2019.V. 5. No. 2. P. 104-110.
5. Guryev, V. V., Development of renewable IP-source of electricity in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kaku bus E. G., B. A. Yakimovich, Kuvshinov V. V.//Energy and technology 2019. Vol. 5 No. 2. pp. 90-93.
6. Bordan D. F. Potentiality of the development of thermal solar energy for the needs of the municipal economy /Kuvshinov V. V., Kaku-shina E. G., Oleynikov A.M., Ghashim M. // Energy and technology. 2021. Vol. 7. no. 1. pp. 46-52.
7. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic installations to provide thermal and electric energy to Sevastopol/ E.G. Kakushina, A.D. Vasiliev, A.A. Goretsky // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 51-57.
8. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations in the generation of heat and electric energy from one receiving surface / E.G. Kakushina // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 45-50.
9. Avakian M. K. Methods of solving global optimization applied to energy systems / Avagyan M. K., Peryshkin M. D., Kakushin E. G., Reshetnikova T. V., Solomonenko A. V.// Energy and technology - 2020. Vol. 6 No. 4. S. 38-41.

УДК 620.92

# Система электроснабжения жилого комплекса на базе преобразователей солнечной энергии с возможностью генерации электрической энергии в общую энергосеть

В.В. Кувшинов[1], М.Ю. Сперанский[2], Н.Н. Смокталь [3], И.Г. Жиганов [4], Д.Ф. Бордан [5]

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия,*
*[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]MYSperanskiy@sevsu.ru, [3]NNSmoktal@sevsu.ru, [4]ZiganobI@mail.ru,, [5]bordan79@mail.ru.*

Статья поступила 21.02.2022 г.; после доработки 22.02.2022 г.

***Аннотация***

*В работе приведены результаты исследований солнечной электроустановки для обеспечения жилого дома. Характеристики установки зависят от климатических условий Крымского полуострова, в работе приведены расчеты прихода солнечной радиации, ветровая нагрузка, изменения атмосферой температуры. Данные позволяют эффективно проводить энергетические расчеты и выработку электроэнергии предложенной фотоэлектрической системы.*

*Ключевые слова:* солнечные установки, фотоэлектрический модуль, эффективность работы.

# The power supply system of the residential complex based on solar energy converters with the possibility of generating electric energy into the general power grid

V.V. Kuvshinov[1], M.Yu. Speranskiy[2], N.N. Smoktal[3], I.G. Zhiganov[4], D.F. Bordan[5]

*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,*
*[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]MYSperanskiy@sevsu.ru, [3]NNSmoktal@sevsu.ru, [4]ZiganobI@mail.ru, [5]bordan79@mail.ru.*

Received 21.02.2022 y.; received in final form 22.02.2022 y.

***Abstract***

*The paper presents the results of research of a solar power plant to provide a residential building. The characteristics of the installation depend on the climatic conditions of the Crimean peninsula, the paper presents calculations of the arrival of solar radiation, wind load, changes in temperature by the atmosphere. The data allow efficient energy calculations and power generation of the proposed photovoltaic system.*

*Keywords:* solar installations, photovoltaic module, work efficiency.

## Введение

Солнечная энергия является наиболее мощным и доступным из всех видов нетрадиционных и возобновляемых источников энергии в Крыму. Солнечное излучение не только неисчерпаемый, но и абсолютно чистый источник энергии, обладающий огромным энергетическим потенциалом [4].

В реальных условиях облачности, годовой

приход суммарной солнечной радиации на территории Крымского региона находится на уровне 800-1000 кВт *ч/м*$^2$.

При этом, доля прямой солнечной радиации составляет: с ноября по февраль 20-40 %. с марта по октябрь - 40-65%, на Южном берегу Крыма в летние месяцы - до 65-70%.

В Крыму наблюдается также наибольшее число часов солнечного сияния в течение года (2300-2400 часов в год), что создает энергетически благоприятную и экономически выгодную ситуацию для широкого практического использования солнечной энергии.

## Постановка задачи

В представленной работе было проведено проектирование [6-11] и расчет автономной высокоэффективной системы электроснабжения для частного жилого строения, расположенного в пригороде Симферополя (село Пионерское). Диаграммы, показывающие поступление солнечной радиации на каждом направлении на рисунке 1. данные приведены в табл. 1

***Таблица 1.***

| Месяц | Ед. изм. | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Январь | кДж/м$^2$ч | - | - | 4244 | 12028 | 16835 | 12028 | 4244 | - |
| Июль | кДж/м$^2$ч | 1779 | 5959 | 10451 | 10546 | 6748 | 10546 | 10451 | 5959 |

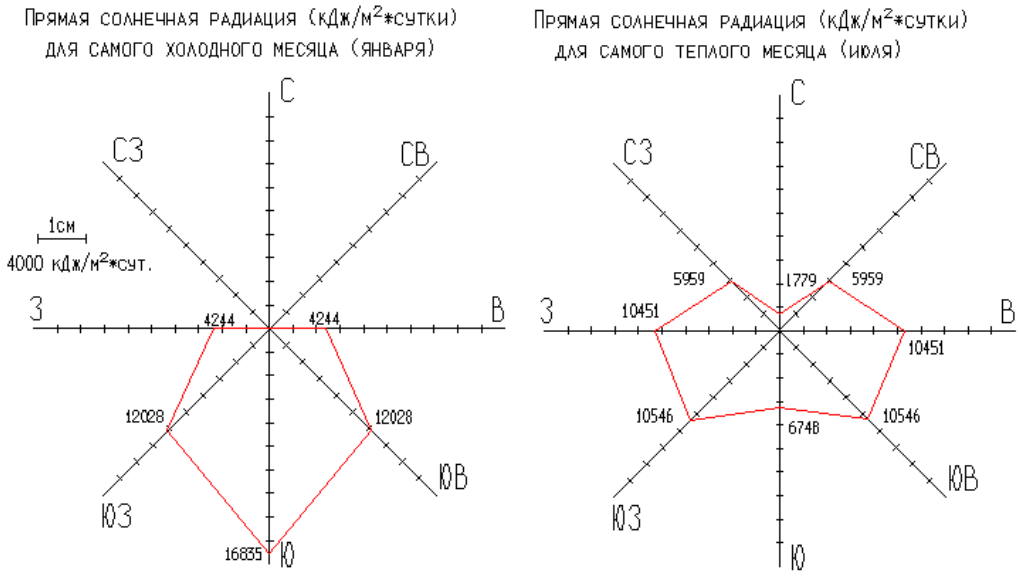
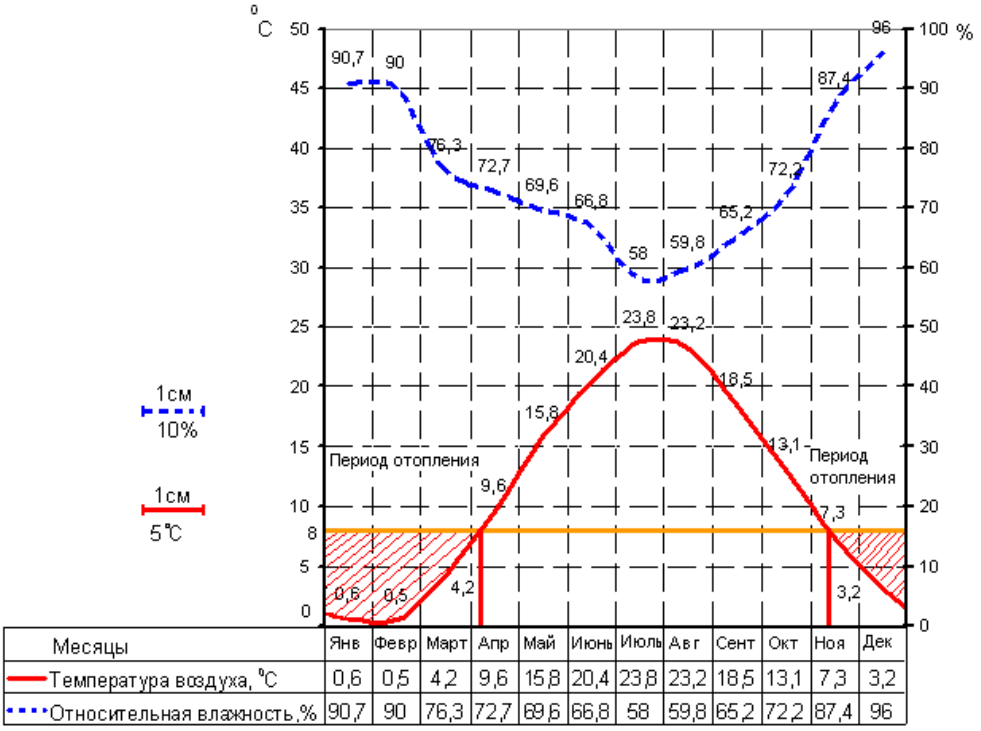



**Рис. 1.** Диаграммы поступления солнечной радиации в июле и в январе

Для определения периода отопления и правильного выбора материалов наружных, ограждающих конструкций [9-11] строим графики годового хода температуры наружного воздуха и влажности, данные приведены в табл. 2.

***Таблица 2*** *Температура и относительная влажность наружного воздуха*

| Показатели | Месяцы | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | январь | февраль | март | апрель | май | июнь | июль | август | сентябрь | октябрь | ноябрь | декабрь |
| Температура наружного воздуха, $^0$С | 0,6 | 0,5 | 4,2 | 9,6 | 15,8 | 20,4 | 23,8 | 23,2 | 18,5 | 13,1 | 7,3 | 3,2 |
| Относит. влажность, % | 90,7 | 90 | 76,3 | 72,7 | 69,6 | 66,8 | 58 | 59,8 | 65,2 | 72,2 | 87,4 | 96 |




| Месяцы | Янв | Февр | Март | Апр | Май | Июнь | Июль | Авг | Сент | Окт | Ноя | Дек |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Температура воздуха, °С | 0,6 | 0,5 | 4,2 | 9,6 | 15,8 | 20,4 | 23,8 | 23,2 | 18,5 | 13,1 | 7,3 | 3,2 |
| Относительная влажность,% | 90,7 | 90 | 76,3 | 72,7 | 69,6 | 66,8 | 58 | 59,8 | 65,2 | 72,2 | 87,4 | 96 |

**Рис 2** Графики годового хода температуры и влажности

Для построения диаграммы температурно-ветрового режима (рис.3) данные по повторяемости и скорости ветра принимаем по СНиП 2.01.01-82 [6], а температуру на каждом направлении ветра по данным метеостанций. Данные приведены в таблице 3.

***Таблица 3*** *Направление, скорость и температура ветра на каждом направлении*

| | | С | СВ | В | ЮВ | Ю | ЮЗ | З | СЗ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Январь | Повторяемость направления, % | 60 | 2 | 1 | 2 | 10 | 10 | 2 | 13 |
| | Средняя скорость, м/с | 6,7 | 4 | 2,4 | 2,1 | 4,1 | 4,5 | 2,5 | 4,4 |
| | Температура на направлении, $^0$С | 1,9 | 2,3 | 3 | 3,6 | 7 | 5,9 | 3,4 | 1,9 |
| Июль | Повторяемость направления, % | 50 | 6 | 1 | 1 | 22 | 10 | 2 | 8 |
| | Средняя скорость, м/с | 4,3 | 5,4 | 3,8 | 1,5 | 3,1 | 3,4 | 1,8 | 4,1 |

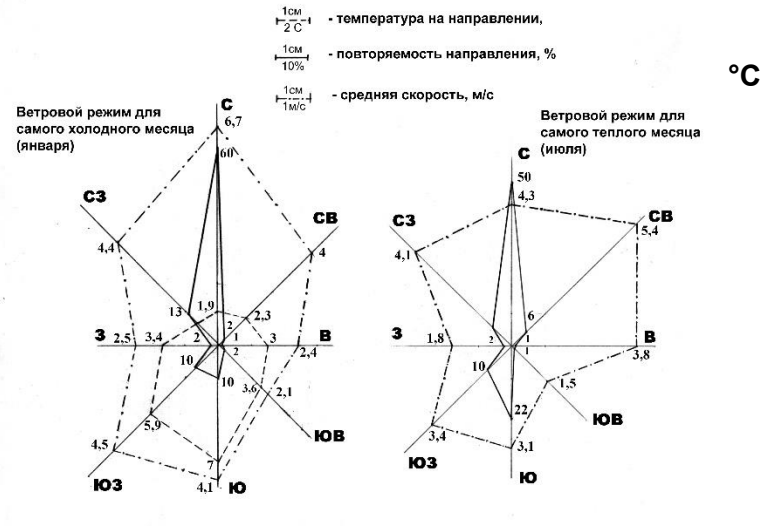



**Рис. 3**. Диаграммы температурно-ветрового режима

Для теплотехнического расчета наружных ограждающих конструкций [6-9, 12] строим шкалу температур (рис. 4) по данным СНиП 2.01.01-82 [6] (таблица 4).

***Таблица 4*** *Данные для шкалы температур.*

| Температура наружного воздуха, $^0$C | | | | | | Период со средней суточной температурой воздуха | | Средняя температура наиболее холодного периода, $^0$C | Продолжительность периода со среднесуточной температурой ≤ 0 $^0$C, сут | Средняя температура за отопительный период, $^0$C |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | ≤8$^0$C | ≤10$^0$C | | | |
| Среднегодовая | Абсолютная минимальная | Абсолютная максимальная | Средняя максимальная наиболее жаркого месяца | Наиболее холодных суток обеспеченностью 0,92 | Наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 | Средняя температура, $^0$C | Средняя температура, $^0$C | | | |
| 11,7 | -25 | 38 | 28,1 | -19 | -15 | 2,9 | 3,7 | -2 | 16 | 4,2 |

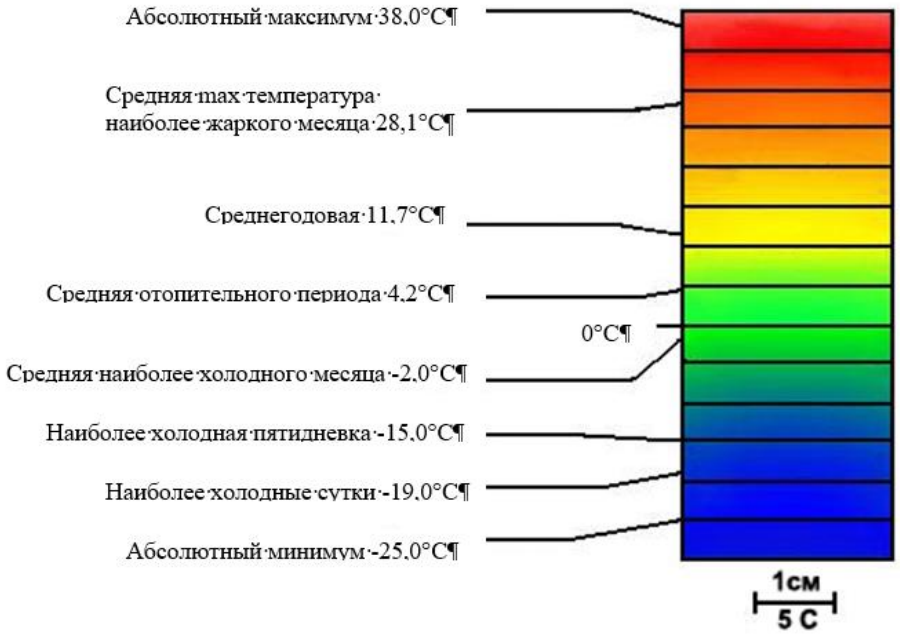



**Рис. 4.** Шкала температур

## Выводы

Отопительный период с ноября по апрель; максимальное количество солнечной радиации поступает в зимний период на южный румб 16835 кДж/м$^2$·сут; в январе по повторяемости преобладает северный ветер (60%) со скоростью 6,7м/с, максимальная температура на южном направлении ветра (7$^0$C), а минимальная на северном и северо-западном направлении ветра (1,9$^0$C). В июле преобладает северный ветер (50%) со средней ско

ростью 4,3м/с. Средняя температура за отопительный период (4,2$^0$C) с периодом накопления влажности (август-декабрь). Период отопления с 1 ноября по 20 апреля.

Фасад здания (9-1/3) ориентирован на юго-восток, на нем расположена большая часть окон, фасад 1/2-9 ориентирован на северо-запад.

Такая посадка здания обусловлена соображениями энергоэкономичности [6-8, 12], на фа-

саде 1/2-9 расположено минимальное количество окон, т.к. теплопотери на этом направлении самые большие, инсоляция этого фасада, особенно в зимнее время, минимальна.

Солнечные батареи запроектировано установить на кровле пансионата на юго-восточном направлении (фасад 9-1/3), т.к. количество солнечной радиации на этом направлении максимально.

## Системы автономного электроснабжения жилого комплекса

Функциональная схема системы автономного электроснабжения представлена на рисунке 5.

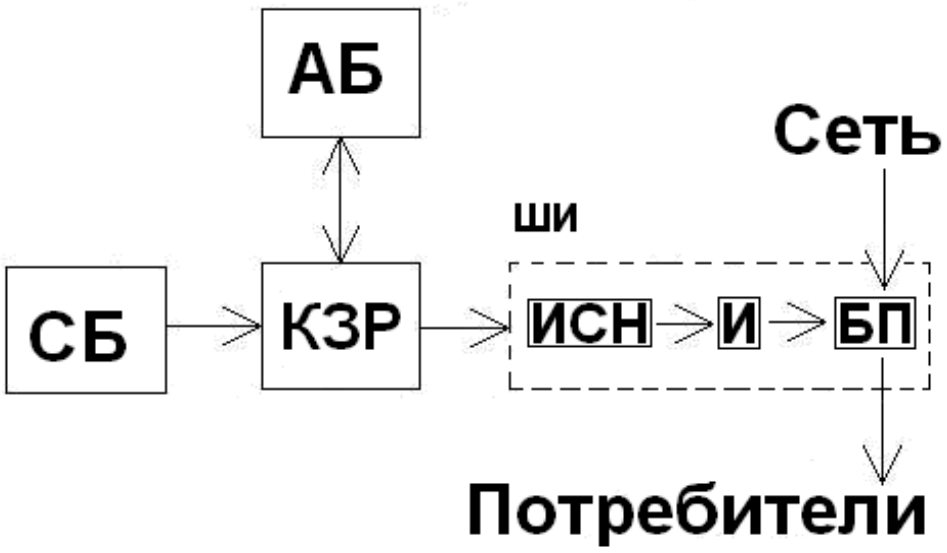



**Рис.5.** Функциональная схема автономного электроснабжения

*Описание работы схемы, назначение её компонентов.*

***СБ*** – солнечная батарея необходимой мощности, набирается из стандартных элементов для получения заданных параметров. Далее будет произведен расчет необходимой коттеджу электрической энергии, задано время автономной работы. И соответственно будут выбраны параметры солнечной и аккумуляторной батарей.

Для уменьшения потерь в инверторе и проводах следует выбирать возможно большее значение напряжения солнечной батареи. Особенно это важно для больших мощностей (свыше 1000Вт).

Напряжение солнечной батареи выбирается с учетом входного напряжения инвертора, выбираемого из стандартного ряда 12, 24, 48, 96, 110, 220В. Номинальное напряжение солнечной батареи должно быть несколько выше номинального напряжения аккумуляторной батареи для обеспечения возможности её заряда.

***КЗР*** – контроллер заряда-разряда аккумулятора. Контролирует заряд-разряд аккумуляторной батареи. При наличии достаточного для работы напряжения на выходе солнечной батареи КЗР направляет часть её энергии на заряд аккумулятора (в КЗР содержится регулятор избыточной мощности РИМ и регулятор заряда РЗ которые в комплексе регулируют параметры напряжения и тока заряда аккумулятора, тем самым, предохраняя аккумуляторную батарею от избыточного или недостатка тока и напряжения заряда), а часть на работу инвертора; при заряженном аккумуляторе вся энергия солнечной батареи расходуется инвертором; при отсутствии солнца аккумулятор разряжается на инвертор.

***АБ*** – блок аккумуляторных батарей. Является буферным каскадом для компенсации как кратковременного, так долговременного пропадания напряжения от солнечных батарей. Параметры и тип АБ будут выбраны далее.

***ИСН*** – импульсный стабилизатор напряжения. Стабилизирует напряжение на входе инвертора. Целесообразно использовать импульсный стабилизатор, который имеет высокий КПД (порядка 0,9…..0,95).

***И*** – инвертор - это устройство, преобразующее постоянный электрический ток в переменный промышленной частоты 50 Гц. В данном случае инвертор будет трехфазным в связи с

большой мощностью нагрузки.

***БП*** – байпас – это блок автоматического переключения мощности СБ и АБ на мощность сети, в случае отсутствия мощности на СБ и АБ. При этом работа инвертора останавливается. Сеть является резервным источником электрического тока.

***ИСН***, ***И*** и ***БП*** это устройства в виде отдельных блоков, которые подключаются в одно интегрированное устройство, которое располагается в виде шкафа инвертора (ШИ). ИСН и БП являются вспомогательным оборудованием инвертора, поэтому сам шкаф с оборудованием мы будем называть инвертором.

*Исходные данные:*

- Место установки: с. Пионерское Симферопольского района.
- КПД фотоэлектрических батарей: 15%.
- Угол наклона ФЭП выбираем согласно широте местности: $44,3°$.
- Нагрузка постоянного тока в день, питаемая инвертор, принимается равной $A_{дн}$ = 374 (А·ч).

Определим общее потребляемое количество электричества с учетом потерь в АБ. Умножим значение $A_{дн}$ на коэффициент 1,08 для учёта потерь на заряд аккумуляторной батареи:

$$q_{АБ} = A_{дн} \cdot 1{,}08 = 374 \cdot 1{,}08 = 403{,}92\,(A \cdot ч).$$

Разделим общее потребляемое количество электричества $q_{АБ}$, с учетом потерь на АБ, на среднее количество солнечных пиковых часов $n_{пик}$. Среднее количество пиковых солнечных часов в местности составляет 9 ч в сутки. Тогда требуемое количество электричества от солнечных батарей $q_{СБ}$:

$$q_{СБ} = \frac{q_{АБ}}{U_{бат}} = \frac{403{,}92}{9} = 44{,}88\,(A)$$

Зная требуемое количество ампер от солнечных батарей, применим для данной установки фотоэлектрический модуль РЕМ-160/Х-72М, рисунок 6 (производитель Китай).

*Особенности:*

Солнечные батареи сохраняют работоспособность:

- в диапазоне температур -50…+75°С;
- атмосферном давлении 84-106,1 кПа;
- относительной влажности до 100%;
- дождя интенсивностью 5мм/мин;
- снеговой или гололедной нагрузки до 200Па.

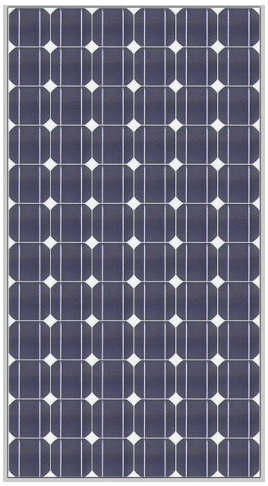


**Рис. 6.** Внешний вид ФЭМ (РЕМ-160/Х-72М)

*Конструктивные характеристики:*

Солнечная батарея (солнечный каркасный модуль) РЕМ-160/Х-72М выполнена в виде панели, заключенной в каркас из алюминиевого профиля (рис.7). Панель представляет собой фотоэлектрический генератор, преобразующий световой поток в электрическую энергию, состоящий из закаленной, просветленной, с антибликовой поверхностью стеклянной плиты с герметично заламинированным на ней элементами. С задней стороны находится клемная коробка, предназначенная для подключения панели.

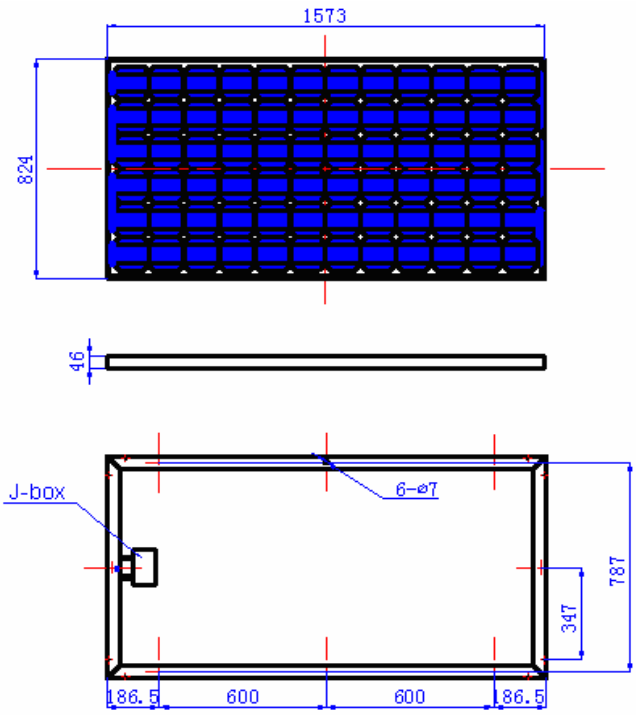



**Рис. 7.** Конструкция ФЭМ

Количество элементов на фотопанели: 72шт. псевдо-квадрат 125мм×125мм.

Размеры: 1573×824×46,5мм

Площадь: 1,3м$^2$

Вес: 15кг

*Технические характеристики ФЭМ:*

Пиковая мощность: 175±3% Вт

Номинальное напряжение: 24 В

Номинальный ток: 7,5А

Напряжение в точке максимальной мощности: 34±5% В

Ток в точке максимальной мощности: 5,15±5% А

Ток короткого замыкания: 5,73±5% А

Напряжение холостого хода: около 43,6±5% В

Температурный коэффициент мощности: -(0,5±0,05%) /°С

Производитель: Китай

Цена: 7350 руб.

## Расчет количества и общей площади ФЭМ

Для определения количества модулей, соединенных параллельно, делим количество тока от солнечных батарей $q_{СБ}$ на значение номинального тока одного фотоэлектрического модуля. Номинальный ток ФЭМ

$$q_{ном} = 7{,}5A$$

$$N_{пар} = \frac{q_{СБ}}{q_{ном}} = \frac{44{,}88}{7{,}5} = 5{,}984 \approx 6 модулей$$

Для определения количества модулей [4], соединенных последовательно, для обеспечения требуемого выходного напряжения постоянного тока, делим номинальное напряжение системы $U_{ном} = 220\,B$ на напряжение в точке максимальной мощности. Номинальное напряжение ФЭМ составляет $U_{ФЭМ} = 24\,B$

$$N_{посл} = \frac{U_{ном}}{U_{ФЭМ}} = \frac{220}{24} \approx 10 \ модулей$$

Общее количество модулей определяем умножением числа модулей, включенных параллельно, на число последовательных:

$$N_{общ} = N_{парал} \cdot N_{посл} = 6 \cdot 10 = 60 шт$$

Общая площадь определяется произведением площади одного модуля на их количество:

$$S_{общ} = N_{общ} \cdot S = 120 \cdot 1{,}3 = 78 м^2$$

## Контроллер заряда-разряда (КЗР)

КЗР – это комплексное оборудование, которое интегрируется с каждой АБ. КЗР состоит из регулятора избыточной мощности (РИМ), регулятора заряда (РЗ), регулятор разряда (РР), а также реле, которые регулируются РИМ, РЗ и РР.

Функциональная схема приведена на рисунке 8.

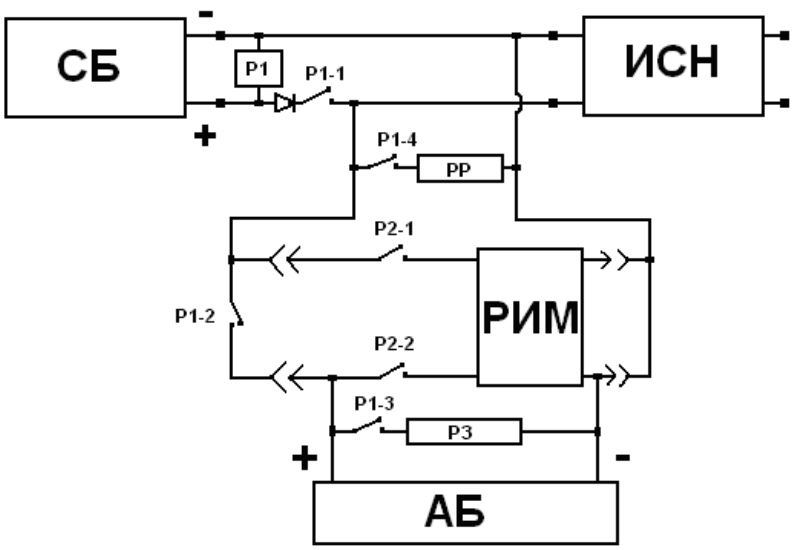



**Рис. 8.** Функциональная схема КЗР

Система функционирует следующим образом. Когда СБ освещается солнечным светом, возникает напряжение, которое активирует реле Р1, включая ключи Р1-1, Р1-3 и отключая Р1-2, Р1-4. Включенный ключ Р1-1 подает напряжение на ИСН и параллельно на АБ. Перед тем как поступить на АБ, напряжение подается на РИМ, которое регулируется ключами Р2-1 и Р2-2. В свою очередь, ключи Р2-1 и Р2-2 регулируются Р3. Если АБ разряжена (напряжение АБ 10,2В), то Р3 определяет ее разряженной и включает ключи Р2-1 и Р2-2, тем самым, подключая РИМ к АБ для заряда, если она зарядилась (напряжение АБ 14.4В) – то отключает, тем самым, предохраняя АБ от перезаряда.

Когда солнечный свет пропадает, то напряжение с СБ исчезает тем самым деактивируя реле Р1, отключая ключи Р1-1, Р1-3 и включая Р1-2, Р1-4. В данном случае, отключенный ключ Р1-1 изолирует СБ от системы, а ключ Р1-2 подключает заряженные АБ к системе. Отключенный ключ Р1-3 изолирует Р3, чтобы он не смог включить ключи Р2-1 и Р2-2, тем самым, предотвращая подачи напряжения на РИМ. Включенный ключ Р1-4 подключает к системе регулятор разряда РР, который регулирует ключ Р1-2 . Если напряжение упало до критического значения (напряжение 19-ти АБ 193.8В), то РР отключает ключ Р1-2, тем самым, предохраняя АБ от полного разряда.

РИМ представляет собой многоканальное устройство, понижающее напряжение до необходимого для заряда АБ, а именно до 2,3В.

Р3 представляет собой такую схему (рис.9):

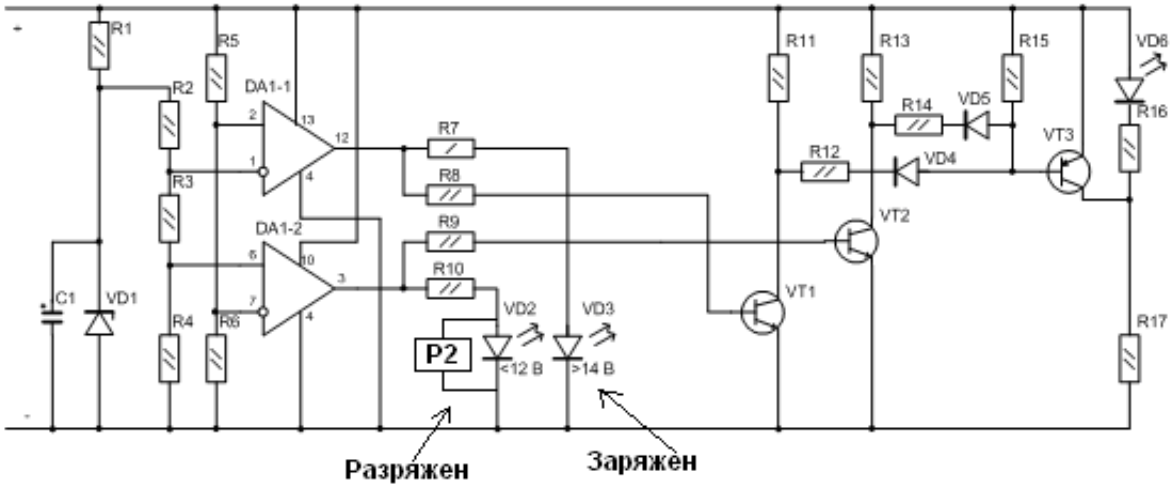



**Рис. 9.** Принципиальная схема Р3

Как известно, при напряжении на клеммах 12-ти вольтового аккумулятора равном 10,2 В аккумулятор считается разряженным; при напряжении 14,4 В он считается заряженным.

Для определения этих порогов служат два компаратора: DA1-1 и DA1-2, собранные на базе сдвоенного операционного усилителя К140УД20.

Питается устройство от этого же аккумулятора. Датчиком напряжения аккумулятора служит сам аккумулятор. Делителем напряжения R5, R6 напряжение аккумулятора делится на два. Источником напряжения установки: $U_{акк} < 10,2B$ и $U_{акк} > 14,4B$ служит параметрический стабилизатор, собранный на элементах VD1, R1, C1 . Напряжение стабилизации выбирается ниже нижнего порога (аккумулятор считается разряженным).

РР представляет аналогичную схему, что на рисунке 9, только рассчитанного не на напряжение 12В, а на напряжение 220В. Если напряжение всех 19-ти АБ составляет 193,8В, то, как оговаривалось выше, РР отключает Р1-2.

## Заключение

Получение электроэнергии из солнечных лучей стало рентабельным не сразу. Произошло это благодаря тому, что за последнее десятилетие цены на дорогие кремниевые батареи упали примерно в три-четыре раза. По оценкам весьма авторитетных экспертов ожидается, что вскоре цены на них снизятся еще на порядок.

Расчет стоимости установки показал, что на данный момент стоимость автономной системы энергоснабжения довольно высока, и окупиться может только в далекой перспективе. Но данная система способна обеспечить высокий уровень автономности системы энергоснабжения и экологичность электроэнергии. Применение фотопанелей для электроснабжения в скором времени может стать целесообразным в связи с ростом цен на электроэнергию, развитием технологии производства фотопанелей, повышением их КПД, снижением стоимости.

В данной системе применено новейшее оборудование с высокими техническими характеристиками и большим сроком службы, высокой надежностью. Срок службы выбранных необслуживаемых аккумуляторных батарей составляет 10-12 лет, что является высоким показателем, то же касается и остального оборудования. Итак, срок службы установки до капитального ремонта составляет 10 лет.

## Список литературы


1. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983.
2. СНиП 2.08.02. – 89. Общественные здания и сооружения / Госстрой СССР, М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1990. – 40 с.
3. ГОСТ 21.404-85. Автоматизация технологических процессов.
4. Справочник по сопротивлению материалов / Фесик С.П. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Будівельник 1982. – 280 с.
5. Справочник по полупроводниковым приборам / В.Ю. Лавриненко – Киев: Техника, 1984.
6. Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма / [Н.В. Багров, А.И. Боков, Э.А. Бекиров, В.В. Кувшинов и др.]. – Симферополь: Крымский научный центр, 2009. – 293 с.
7. Алферов Ж.И., Андреев В.М. Перспективы фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии Преобразование солнечной энергии. / Под ред. Н.Н. Семенова. – Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1981. – 20 с
8. Исследование гибридных ветро–солнечных систем для энергетического комплекса Ирака Абдали Л.М., Аль-Руфайе Ф.М., Кувшинов В.В., Аль-Антаки, А.М., Морозова, Н.В. Прикладная солнечная энергия (перевод Гелиотехники на английский язык), 2020, 56(4), с.284-290
9. Исследование потерь фотоэлектрических солнечных систем при работе в условиях частичного затенения Кузнецов П.Н., Абдали Л.М., Кувшинов В.В., Мохаммед, Х.Дж., Аль-Байрмани, А.Г. Журнал прикладной инженерной науки, 2020, 18(3), С.313-330
10. Применение нанокластерных покрытий для модификации поверхности приема изображения термофотоэлектрических преобразователей энергии Крит Б.Л., Кувшинов В.В., Кукушкин Д.Ю., Ревенок Т.В., Слепцов В.В. Инженерия поверхности и прикладная электрохимия, 2020, 56(1), с.100-104
11. Власов Н.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Сперанский М.Ю., Лавренчук А.А, Возможности увеличения выходных характеристик фотоэлектрических преобразователей в зависимости от оптической прозрачности защитных покрытий, Энергетические установки и технологии, Севастополь ФГАОУ ВО СевГу, 2021, Т7 №2, с 62-66
12. Жиганов И.Г., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Сперанский М.Ю., Лавренчук А.А, Некоторые результаты исследования характеристик тепловой ге-лиоустановки с фотоэлектрическим источником питания Энергетические установки и техно-логии, Севастополь ФГАОУ ВО СевГу,

2021, Т7 №2, с 67-72

## References


1. Raushenbakh G. Handbook for the design of solar panels: Per. from English. Moscow: Energoatomizdat, 1983.
2. SNiP 2.08.02. - 89. Public buildings and structures / Gosstroy of the USSR, M .: CITP Gosstroy of the USSR, 1990. - 40 p.
3. GOST 21.404-85. Automation of technological processes.
4. Handbook on the strength of materials / Fesik S.P. - 2nd ed., revised. and additional - K .: Budivelnik 1982. - 280 p.
5. Handbook of semiconductor devices / V.Yu. Lavrinenko - Kyiv: Technique, 1984.
6. Solar energy for the sustainable development of the Crimea / [N. V. Bagrov, A. I. Bokov, E. A. Bekirov, V. V. Kuvshinov, etc.]. - Simferopol: Crimean Scientific Center, 2009. - 293 p.
7. Alferov Zh.I., Andreev V.M. Prospects for the photoelectric method of converting solar energy Converting solar energy. / Ed. N.N. Semenov. - Chernoy-slick: Institute of Chemical Physics of the Academy of Sciences of the USSR, 1981. - 20 p.
8. Study of hybrid wind-solar systems for the energy complex of Iraq Abdali L.M., Al-Rufaye F.M., Kuvshinov V.V., Al-Antaki A.M., Morozova N.V. Applied Solar Energy (translation of Solar Engineering into English), 2020, 56(4), p.284-290
9. Investigation of losses of photovoltaic solar systems during operation in conditions of partial shading Kuznetsov P.N., Abdali L.M., Kuvshinov V.V., Mohammed, H.J., Al-Bayrmani, A.G. Journal of Applied Engineering Science, 2020, 18(3), pp.313-330
10. Application of nanocluster coatings for modification of the image receiving surface of thermophotoelectric energy converters B.L. Krit, V.V. Kuvshinov, D.Yu. Kukushkin, T.V. Revenok, V.V. Sleptsov. Surface Engineering and Applied Electrochemistry, 2020, 56(1), pp.100-104
11. N. A. Vlasov, V. V. Kuvshinov, E. G. Kakushina, M. Yu. Sevastopol FGAOU VO SevGU, 2021, T7 No. 2, p 62-66
12. I. G. Zhiganov, V. V. Kuvshinov, E. G. Kakushina, M. Yu. Sevastopol FGAOU VO SevGU, 2021, T7 No. 2, p 67-72

УДК 620.92

# Исследование эффективности работы фотоэлектрических панелей, используемых для работы на солнечных электростанциях и для обеспечения автономных потребителей

В.В. Кувшинов[1], М.Ю. Сперанский[2], В.А.Березняк [3], Н.А.Власов [4], А.А. Лавренчук [5]

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия,*

*[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]MYSperanskiy@sevsu.ru, [3]gern96-10@mail.ru, [4]mr.asphodel@mail.ru, [5]AALavrenchuk@sevsu.ru.*

Статья поступила 24.02.2022 г.; после доработки 28.02.2022 г.

**Аннотация**

*Приведены результаты исследований промышленных характеристик фотоэлектрических кремниевых панелей в зависимости от угла установки рабочей поверхности модуля. Показано несоответствие теоретических расчетов и натурных исследований заводского монокремниевого модуля, рассчитан дополнительный коэффициент, зависящий от свойств защитного материала с учетом его оптической способности преломления солнечных лучей и влияние на работу фотопреобразователей.*

*Ключевые слова: солнечные установки, фотоэлектрические панели, эффективность работы.*

# Study of the efficiency of photovoltaic panels used to work at solar power plants and to provide autonomous consumers

V.V. Kuvshinov[1], M.Yu. Speransky[2], V.A. Bereznyak[3], N.A. Vlasov[4], A.A. Lavrenchuk[5]

*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,*

*[1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]MYSperanskiy@sevsu.ru, [3]gern96-10@mail.ru, [4]mr.asphodel@mail.ru, [5]AALavrenchuk@sevsu.ru.*

Received 24.02.2022 y.; received in final form 28.02.2022 y.

***Abstract***

*The results of studies of the industrial characteristics of photovoltaic silicon panels depending on the installation angle of the working surface of the module are presented. The discrepancy between theoretical calculations and full-scale studies of the factory monosilicon module is shown, an additional coefficient is calculated depending on the properties of the protective material, taking into account its optical ability to refract sunlight and the effect on the operation of photoconverters.*

Key words: solar installations, photovoltaic panels, work efficiency.

## Введение

Для получения данных исследований фотоэлектрических модулей, используемых в фотоэлектрических установках, с целью изучения их мощностных потерь, необходимо провести натурные испытания при различных углах режимах их работы. В частности, на изменение режимов их работы напрямую влияет изменение их мощностных характеристик, связанное с различными факторами. Такими факторами являются изменение угла падения солнечных лучей на их

приемную поверхность, вследствие движения Солнца по небосклону, изменение интенсивности потока солнечной радиации, вследствие облачности, изменение атмосферной температуры, наличие снегового покрова и др.

## Постановка задачи

С целью получения характеристик для эффективной работы фотоэлектрического модуля проводились эксперименты по определению различных режимов работы серийного заводского модуля ISM-50 (серия 49), предоставленного для исследования НИО ЗАО завод им. Ильича, Донецкая область (рис. 1).

Исследования характеристик фотоэлектрического модуля проводились при различных температурных показателях, различной солнечной освещенности (ясная погода, переменная облачность, пасмурно), в различное время года, эти данные сравнивались с заводским протоколом исследований (см. рис. 2).

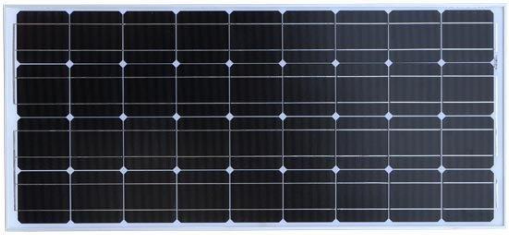


**Рис. 1.** Фотоэлектрический модуль ISM-50 (серийный номер 49). Производство ЗАО завод им. Ильича, Донецкая область

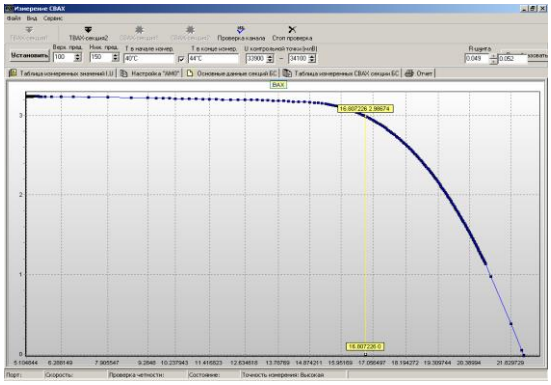


**Рис. 2.** Протокол заводских исследований

При проведении измерений использовалась типичная схема подключения фотоэлектрического модуля и измерительных приборов (рис. 3). Для установки фотоэлектрического модуля при измерениях отклонения рабочей поверхности модуля от направления на Солнце использовалась опорная панель с изменяемым углом установки (рис. 4).

***Таблица 1*** *Параметры модулей ARX-12, ECS-30 ISM-50*

| Заводские характеристики модуля | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Модуль | Колич-ест. эле-ментов | $P_{max}$ | $T_{поверх.}$ | Длина | Ширина |
| ISM-50 | 36 | 50 Вт | 25ºC | 1,03 м | 0,45 м |
| ECS-30 | 36 | 30 Вт | 25ºC | 0,65 м | 0,35 м |
| ARX-12 | 36 | 12 Вт | 25ºC | 0,35 м | 0,25 м |
| Данные заводских измерений | | | | | |
| Модуль | КПД | $I_{p\ max}$ | $U_{p\ max}$ | $I_{кз}$ | $U_{xx}$ |
| ISM-50 | 14% | 3 А | 16,8 В | 3,24 А | 22 В |
| ECS-30 | 17 % | 1,7 А | 18 В | 1,9 А | 21 В |
| ARX-12 | 15% | 0,7 А | 17В | 0,72 А | 22 В |

При проведении экспериментов исследовались вольт-амперные характеристики модулей: ARX-12, ECS-30 и ISM-50.

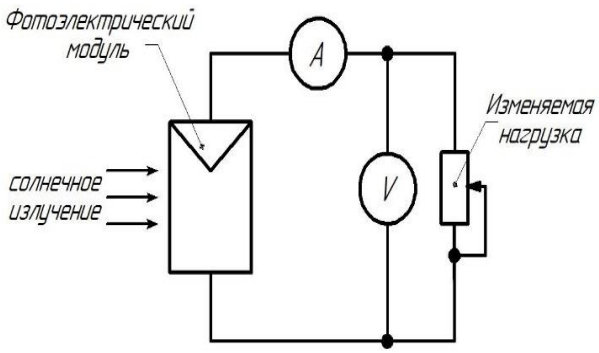



**Рис. 3**. Блок-схема для измерения нагрузочных характеристик

В таблице 1 приведены сезонные данные вольт-амперных характеристик (ВАХ) модуля ISM-50, полученные при прямых измерениях тока и напряжения в зависимости от различных значений нагрузочного сопротивления Rн [2]. По данным таблицы 2 можно говорить о различии в значениях мощности при одинаковой освещенности, в зависимости от времени года [21-23].

По вольт-амперным характеристикам можно говорить о качестве работы модуля (рис. 4). По мощностным характеристикам можно говорить, о том какую выработку электрической энергии мы получим в данное время года, суток, при данных климатических факторах. Эти ре-

зультаты необходимы при расчетах систем солнечного электрообеспечения, при проектировании фотоэлектрических станций [2].

***Таблица 2*** *Данные вольтамперных измерений модуля ISM-50*

| Данные измерений (лето) | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| U(В) | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 |
| I (А) | 3,5 | 3,5 | 3,5 | 3,4 | 3,35 | 3,25 | 3 | 2,7 | 2,35 | 1,75 | 1 | 0 |
| P (Вт) | 0 | 7 | 14 | 20,4 | 26,8 | 32,5 | 36 | 37,8 | 37,5 | 31,5 | 20 | 0 |
| Данные измерений (зима) | | | | | | | | | | | | |
| I (А) | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,75 | 2,7 | 2,65 | 2,56 | 2 | 0 | |
| U(В) | 0 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | |
| P (Вт) | 0 | 5,6 | 11,2 | 16,8 | 22,4 | 27,5 | 32,4 | 37,1 | 41 | 36 | 0 | |

| Основные характеристики модуля ISM-50 | | | | |
|---|---|---|---|---|
| $I_{к.з.}$(А) | $U_{xx}$(В) | $I_{max}$(А) | $U_{max}$(В) | $P_{max}$(Вт) |
| 3,5 | 22 | 2,35 | 16 | 37,5 |
| 2,8 | 20 | 2,56 | 16 | 41 |
| Освещенность 825 Вт/м$^2$ (одинакова для обоих измерений) | | | | |

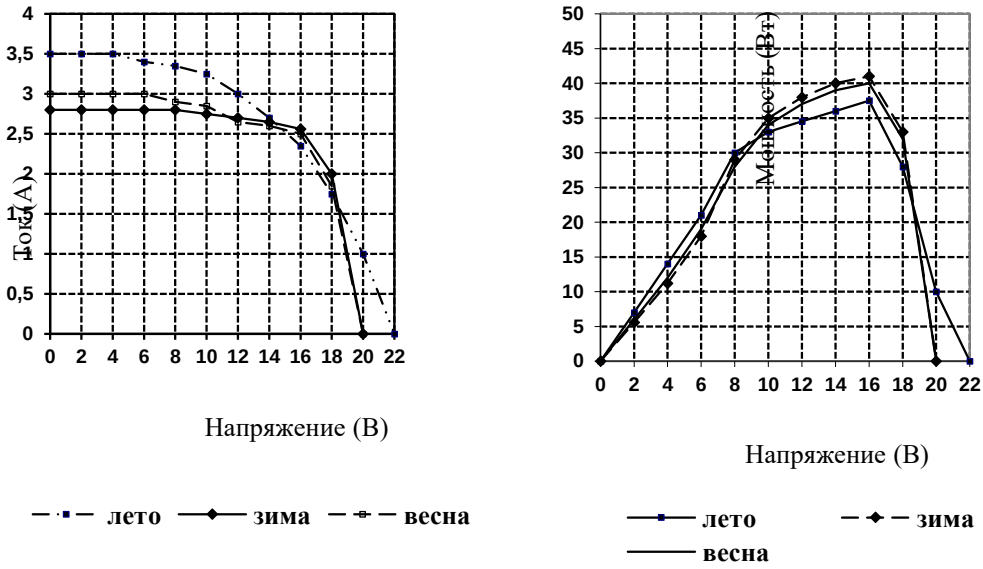



**Рис. 4**. Зависимость вольт-амперной и мощностной характеристик модуля ISM-50

В натурных условиях изменения угла падения лучей на приемную поверхность фотоэлектрического модуля на определенный градус приводят к изменению освещенности рабочей поверхности модуля Ебат. на определенную величину, что, в свою очередь, влияет на работу фотоэлектрического модуля [2, 23].

Смоделировать ситуацию изменения освещенности рабочей поверхности при движении Солнца по горизонту можно, изменяя в течение короткого времени положение угла установки фотоэлектрического модуля к горизонту и, проводя при этом прямые измерения тока и напряжения модуля при изменении нагрузочного сопротивления.

При увеличении освещенности солнечной батареи ток, вырабатываемый ею, увеличивается в прямой зависимости (рис. 5).

Для расчетов вырабатываемой мощности солнечной фотоэлектрической батареи используется известная формула [2]:

$$P_{бат.} = E_o \eta_{эл.} S_{бат.} F \cos\alpha_o, \quad (1, а)$$

где ηэл. – КПД элементов; Ео – солнечная освещенность; Sбат. – площадь солнечной батареи; F – фактор, учитывающий особенности солнечной батареи (заполнении элементами и возможную деградацию её параметров); αо – суммарный угол между нормалью к плоскости модуля и солнечными лучами.

При расчете модуля с заданными параметрами можно использовать другую формулу:

$$P_{мод.} = E_o \eta_{эл.} S_{эл.} \cos\alpha \qquad (1, б)$$

где Sэл. – площадь солнечных элементов в батареи; αн – угол между нормалью к плоскости модуля и солнечными лучами (рис.4).

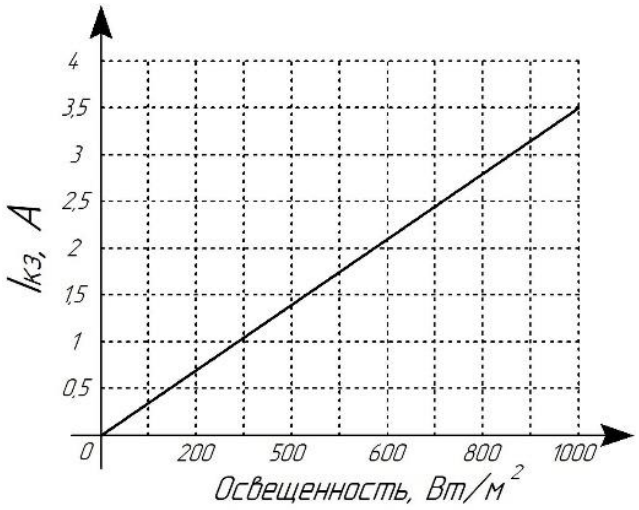



**Рис. 5.** Зависимость тока короткого замыкания от освещенности солнечной батареи

Следовательно, по формуле (1,б) теоретически можно рассчитывать мощностные характеристики фотоэлектрического модуля.

При обработке измерений более удобно использовать другую формулу:

$$P_{бат.} = \eta_{эл.} S_{эл.} E_o \sin\beta_м, \qquad (1, в)$$

где $\beta_м$ – угол установки модуля к плоскости горизонта (рис. 8).

По нашим экспериментальным данным угол наклона модуля по отношению к падающим солнечным лучам сильно влияет на показатели солнечных батарей, в результате изменяются энергетические и мощностные характеристики модуля. В таблице 3 показаны усреднённые результаты нашего исследования, проводимого в течение 2018-2020 годов.

Как видно из таблицы экспериментальные значения мощности фотоэлектрического модуля сильно отличаются от теоретически значений при углах падения лучей уже около 60-70° по отношению к рабочей поверхности модуля. На рис. 6 и 7 приведены теоретические и экспериментальные значения различных параметров фотоэлектрических модулей в зависимости от угла установки.

***Таблица 3*** *Различие теоретических и экспериментальных данных измерений для фотоэлектрического модуля ISM-50*

| Параметры | Характеристики фотоэлектрического модуля ISM-50 | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Угол установки модуля (по отношению к горизонтальной поверхности) | -5° | 5° | 15° | 25° | 35° | 45° | 55° | 65° | 75° | 85° | 95° |
| $I_{к.з}$(А) – теоретическое значение | 2,09 | 2,49 | 2,815 | 3,055 | 3,2 | 3,25 | 3,2 | 3,055 | 2,815 | 2,49 | 2,09 |
| $I_{к.з}$(А) – эксперимент. значение | 1,6 | 2,1 | 2,6 | 2,9 | 3,15 | 3,25 | 3,15 | 2,9 | 2,6 | 2,1 | 1,6 |
| $I_{max}$(А) – эксперимент. значение | 1,28 | 1,848 | 2,368 | 2,655 | 2,8 | 2,72 | 2,8 | 2,655 | 2,368 | 1,848 | 1,28 |
| $U_{max}$(В) – эксперимент. значение | 10 | 12,5 | 14 | 14,5 | 15 | 16 | 15 | 14,5 | 13 | 12,5 | 10 |
| $P_{max}$(Вт) – эксперимент. значение | 12,8 | 23,1 | 33,15 | 38,5 | 42 | 43,5 | 42 | 38,5 | 33,15 | 23,1 | 12,8 |
| $P_{max}$(Вт) – теоретическое значение | 27,97 | 33,32 | 37,67 | 40,89 | 42,85 | 43,5 | 42,85 | 40,89 | 37,67 | 33,32 | 27,97 |
| Данные получены при освещенности 870 Вт/м$^2$ | | | | | | | | | | | |

При измерениях рабочая поверхность модуля изначально была сориентирована перпендикулярно Солнцу, что соответствовало углу установки $45^0$. Затем измерения проводились при изменениях угла подъема фотоэлектрической па-

нели относительно поверхности земли. Измерения проводились в ясный солнечный день, показания освещенности соответствовало постоянному значению 870 Вт/м$^2$, измерялись ток и напряжение в рабочей точке, а также ток $I_{к.з.}$. Данные в таблице 4 получены для конца марта (дни весеннего равноденствия) на широте Севастополя (44,6$^0$ с. ш.). Максимальное значение солнечной освещенности и энергетических показателей модуля для этого времени года соответствует приблизительно углу установки в 45-50$^0$ от горизонтальной поверхности.

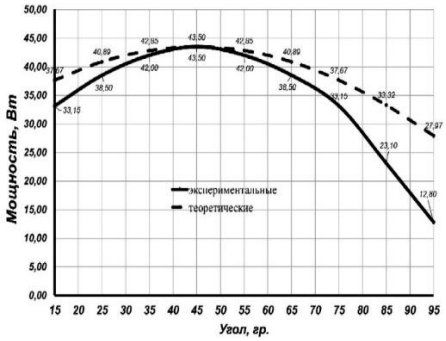



**Рис. 6**. Зависимость изменения выходной мощности фотоэлектрического модуля ISM-50 при изменении угла наклона модуля к горизонту

Экспериментальные данные, полученные для модуля ISM-50, показали различие с теоретическими данными при изменении угла установки плоскости модуля относительно горизонта с погрешностью, определяемой формулами (1). На графиках показаны усредненные результаты значения угла солнечного склонения близкого к значению широты местности, т.е. около 45°(данные получены при освещенности 860 Вт/м2, в дни весеннего равноденствия, в эти дни можно с большей точностью определить угол солнечного склонения для наших экспериментов).

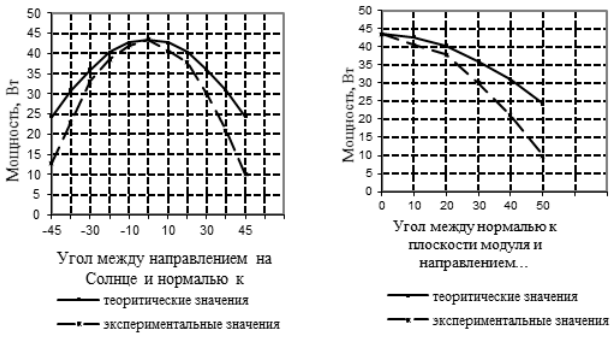



**Рис. 7.** Зависимость изменения и падения выходной мощности фотоэлектрического модуля ISM-50 при изменении угла наклона

Рассмотрим причины несоответствия между теоретическими и экспериментальными данными. Предположим, что это несоответствие заключается в конструкциях солнечных модулей, причем эти конструкции могут отличаться для различных выпускаемых серий.

Значение освещенности активной поверхности солнечной батареи вычисляется из формулы (1, а) и напрямую зависит от косинуса угла падения лучей на рабочую поверхность модуля и плотности потока падающей солнечной радиации [2, 22].

Т.к. освещенность модуля $E_o$ при перпендикулярном падении лучей на рабочую поверхность пропорциональна вырабатываемой мощности, то для расчетов модуля можно использовать формулу:

$$P_{бат.} = \eta_{эл.} S_{эл.} E_{бат.}, \quad (2)$$

где $E_{бат.} = E_o \cos\alpha$, $S_{эл.}$ – суммарная площадь солнечных элементов батареи.

При перпендикулярном падении лучей на рабочую поверхность для расчетов модуля используем формулу:

$$P_{бат.} = \eta_{эл.} S_{эл.} E_o. \quad (3)$$

Формулы (2) и (3) подходят только для расчетов солнечных элементов. Для фотоэлектрического модуля, имеющего поверх элементов несколько видов защитных покрытий, эти формулы необходимо дополнить поправочным коэффициентом. Т.к. каждый тип прозрачного защитного покрытия имеет определенный оптический коэффициент преломления, непосредственно для расчетов фотоэлектрических модулей, вместо формулы (1, а) целесообразно использовать формулу:

$$P_{бат.} = E_o \eta_{эл.} S_{бат.} F \cos\left(K \cdot \alpha_o\right), \quad (4)$$

где $K$ – суммарный коэффициент ослабления светового потока, зависящий от конкретной конструкции и количества защитных покрытий модуля; $\alpha_o$ – начальный гол падения лучей на рабочую поверхность фотоэлектрического модуля (угол между нормалью к плоскости модуля и направлением падения лучей).

Коэффициент отвечает за ослабление солнечной интенсивности, при прохождении солнечных лучей через защитные покрытия модуля. Отсюда можно сделать вывод, что в отличие от теоретических расчетов, при некоторых значениях $K$ интенсивность солнечного потока в самом модуле ослабевает настолько, что солнечные элементы практически не работают, чем

больше защитных покрытий, тем большее влияние на работу модуля оказывает угол установки. При этом защитные покрытия кроме защиты модуля от внешних механических, климатических и др. факторов ограничивают перегрев солнечных элементов. Коэффициент K зависит от конкретной конструкции модуля, а также от количества и формы защитных покрытий модуля.

При использовании фотоэлектрических модулей оптические потери могут резко возрастать (рис. 7), что приводит к падению мощности, это связано с конструкцией защитных покрытий модуля (рис. 8). В справочниках по проектированию батарей [2] и в самой конструкции модуля ISM-50 (рис.1) защитные покрытия герметически приклеены к солнечным элементам, соответственно при прохождении лучей света через них необходимо учитывать коэффициенты преломления каждого покрытия, коэффициенты формы текстурированных покрытий, микронеровности и деформации поверхностей.

Теоретические значения $I_{к.з.}$ должны прямо пропорционально зависеть от освещенности модуля, но это происходит только при перпендикулярном падении лучей на рабочую поверхность, если же лучи падают под углом, то, как показали исследования при некоторых значениях угла установки энергетические характеристики солнечной батареи в несколько раз меньше теоретических значений (табл.4). В результате изменяются и мощностные характеристики модуля, а соответственно и выработка электроэнергии (табл.5). Для определения углового коэффициента К воспользуемся графиками зависимости падения мощности от угла наклона. Определим теоретическую мощность, используя формулу (5):

$$P_{бат.} = E_o \eta_{эл.} S_{эл.} \cos(\mathrm{K} \cdot \alpha),$$
$$P_{\max} = E_o \eta_{эл.} S_{эл.}, при \cos(\mathrm{K} \cdot \alpha) = 1. \quad (5)$$

В Приложении представлены таблицы солнечной инсоляции, а также пропускательную способность некоторых материалов по которым можно рассчитать изменения мощностных показателей модулей.

***Таблица 4*** *Зависимость изменения характеристик модуля от углов установки*

| Параметры | Характеристики фотоэлектрического модуля ISM-50 | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Угол установки модуля (по отношению к горизонтальной поверхности) | -5° | 5° | 15° | 25° | 35° | 45° | 55° | 65° | 75° | 85° | 95° |
| Угол α | 50° | 40° | 30° | 20° | 10° | 0° | 10° | 20° | 30° | 40° | 50° |
| $I_{к.з}$(А) – теоретическое значение | 2,09 | 2,49 | 2,815 | 3,055 | 3,2 | 3,25 | 3,2 | 3,055 | 2,815 | 2,49 | 2,09 |
| cosα | 0,634 | 0,766 | 0,866 | 0,94 | 0,985 | 1 | 0,985 | 0,94 | 0,866 | 0,766 | 0,634 |
| cosKα | 0,294 | 0,531 | 0,689 | 0,885 | 0,965 | 1 | | | | | |
| α° | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 | | | | | |
| K·α° | 73-75 | 57-60 | 45-47 | 30-32 | 15 | 0 | | | | | |
| $P_{max}$(Вт) – эксперим. знач. | 12,8 | 23,1 | 33,15 | 38,5 | 42 | 43,5 | 42 | 38,5 | 33,15 | 23,1 | 12,8 |
| $P_{max}$(Вт) – теор. значение | 27,97 | 33,32 | 37,67 | 40,89 | 42,85 | 43,5 | 42,85 | 40,89 | 37,67 | 33,32 | 27,97 |
| Данные получены при освещенности 870 Вт/м$^2$ | | | | | | | | | | | |

Сравним её с экспериментальными значениями, приведенными в таблице 4. Из расчетов получаем, что коэффициент K составляет приблизительно от 1 до 1,5, в зависимости от материала защитного покрытия модуля.

В таблицах 3-4 приведены основные усреднённые данные для модуля ISM-50 за разные месяцы года, по которым можно судить о работе

солнечной батареи при различном угле наклона.

Эти зависимости могут быть широко использованы для практических целей при проектировании стационарных систем солнечного электрообеспечения [2].

Установка системы ориентации, исходя из данных приведенных в таблице 4, способна повысить выработку электроэнергии фотоэлектрической батареей в 1,5-2 раза, в отличие от теоретических данных, в которых говорится о том, что система ориентации способна поднять производительность солнечной батареи на 30 % [1,2].

## Заключение

В процессе работы были получены результаты, по которым можно сделать следующие основные выводы:

- Для электроснабжения потребителей в труднодоступных районах Российской Федерации более эффективно использование фотоэлектрических установок малой мощности, с различными оптимальными углами установки, наиболее приемлемыми для данной местности.
- На основе проведенных натурных испытаний при различных климатических условиях были получены данные о наиболее эффективных режимах работы поликремневого фотоэлектрического модуля PS 250, которые показали, то в районах с большим количеством пасмурных дней модули фотоэлектрических установок более эффективно располагать на горизонтальной площадке.
- В районах с низкими температурами при проектировании фотоэлектрических станций следует учитывать увеличение КПД фотопреобразователей, и как следствие значительное повышение мощности.
- В местностях с значительным снеговым покровом, при установке модуля с оптимальным углом наклона, возможно повышение мощностных характеристик модулей до 70 %, за счёт отражения солнечных лучей от поверхности снега.
- Как показали исследования, угол установки модуля значительно влияет на его вырабатываемую мощность, однако это происходит только в ясные дни при максимальной освещенности. При сильной облачности, для большей выработки, модули эффективнее располагать горизонтально. Следовательно, при расположении солнечных установок необходимо учитывать количество ясных и пасмурных дней в году.
- Используя при проектировании солнечных электростанций полученные экспериментальные данные, можно значительно поднять выработку электрической энергии.

Анализ, теоретические расчёты и практические исследования, проведенные в работе, позволяют получить более полную информацию о различных режимах работы солнечных электростанций и автономных фотоэлектрических установок.

## Список литературы


1. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / Колтун М.М. – М.: Наука, 1985. – 300 с.
2. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.Бекман У. Расчет систем солнечного теплоснабжения / У. Бекман, С. Кейли, Д. Даффи. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
3. Арбузов Ю.Д. Основы фотоэлектричества / Ю.Д. Арбузов, В.М. Евдокимов – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
4. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование солнечной энергии / Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. – Л: Наука, 1989. – 310 с.
5. Стребков Д.С. Концентраторы солнечного излучения / Д.С. Стребков, Э.В. Тверьянович; под ред. академика РАСХН Д.С. Стребкова. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 316 с.
6. Вейси Ф. Расчет тепловых режимов двухстороннего приемника излучения в статическом солнечном концентраторе / Ф.Вейси, Сергиевский Э.Д., Тюхов И.И. // Материалы 4-й Международной научно-технической конференции, 12-13 мая 2004 г., Москва, ГНУ ВИЭСХ. − М.: ГНУ ВИЭСХ, 2004. – Ч. 4. – С. 114 - 120.
7. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. –[Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).
8. Алферов Ж.И. Солнечные преобразователи на основе гетеропереходов p-$AL_xGa_{1-x}$ – n-GaAs / Ж.И. Алферов, В.М. Андреев, М.Б. Каган. // Физика и техника полупроводников, 1970. – Т. 4. – 400 с.
9. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. – Л: Наука, 1989. – 405 с.
10. Фотоэлектрические приборы. Часть 1. Измерение фотоэлектрических вольтамперных характеристик (МЭК 904-1-87): ГОСТ 28977-91. [Введ.

19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 56 с. – (Национальный стандарт России).
11. Андреев В.М. Фотоэлектрические преобразователи концентрированного солнечного излучения на основе гетероструктур. Фотоприемники и фотопреобразователи / В.М. Андреев, В.Д. Румянцев; под ред. Ж. И. Алферова, В. Шмарцова. – Л.: Наука, 1980. – С. 201 - 204.
12. Вольф М. Кремниевые солнечные элементы / М. Вольф. – Солнечная энергетика; пер. с англ. – М.: Мир, 1999. – С. 195 - 231.
13. Андреев В.М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Андреев В.М., Грилихес В.А., Румянцев В.Д. – Л: Наука, 1989. – 405 с.
14. Григораш О.В. Нетрадиционные автономные источники электроэнергии / О.В. Григораш, Ю. И. Стрелков // Промышленная энергетика, № 4, 2001, с.37-40.
15. Люксметр Ю-116 // Измерительные приборы для электротехнических лабораторий URL: http://pribori.net.ua/U116.html.
16. Функционирование релейной защиты энергосистемы Республики Крым и г. Севастополь, анализ неправильной работы и методы ее устранения // А.Г. Балла, В.С. Скопинский, И.В. Симонов, Е.В. Новак, Б.О. Ленивенко / Энергетические установки и технологии. – Севастополь, Сев ГУ. - 2020. Т. 6. №4.
17. Регулирующий эффект нагрузки по частоте. Влияние на структуру автоматической частотной разгрузки // И.С. Дьяченко, М.Д. Перышкин, Е.В. Новак, Б.О. Ленивенко, Т.А. Львов / Энергетические установки и технологии. – Севастополь, Сев ГУ. - 2020. Т. 6. № 4.
18. Кувшинов В.В., и др. Альтернативная энергетика. Учебное пособие для вузов изд. – М: Издательство «Спутник+», 2020. – 204 с.
19. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. Учебное пособие для вузов изд. М.: Энергоатомиздат, 1987.
20. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. М.: СОЛОН-Пресс, 2005.
21. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: профессиональные решения. М.: СОЛОН-Пресс, 2011.
22. Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Софийский И.Ю. Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии Учебное пособие. – М: Издательство «Спутник+», 2018. – 277 с.
23. Якимов В.А. Применение солнечной энергии. Учеб.-метод. пособие изд. Севастополь: СНУЯЭиП, 2009.

## References

1. Koltun M. M. Optics and metrology of solar cells / Koltun M. M. - M.: Nauka, 1985. - 300 p.
2. Raushenbakh G. Reference book on the design of solar batteries / G. Raushenbakh. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 397 p. - Moscow: Energoatomizdat, 1988. - 176 p.
3. Arbuzov Yu. D. Fundamentals of photoelectricity / Yu. D. Arbuzov, V. M. Evdokimov - M.: GNU VIESKh, 2007. - 292 p.
4. Andreev V. M. Photoelectric conversion of solar energy / Andreev V. M., Grilikhes V. A., Rumyantsev V. D. - L: Nauka, 1989. - 310 p.
5. Strebkov D. S., Tveryanovich E. V. Concentrators of solar radiation; ed. Academician of the Russian Academy of Agricultural Sciences D.S. Strebkov. - M.: GNU VIESKh, 2007. - 316 p.
6. Veisi F. Calculation of thermal regimes of a two-way radiation receiver in a static solar concentrator / F. Veisi, Sergievsky E.D., Tyukhov I.I. // Proceedings of the 4th International Scientific and Technical Conference, May 12-13, 2004, Moscow, VIESH. - M.: GNU VIESKh, 2004. - Part 4. - S. 114 - 120.
7. Photovoltaic devices made of crystalline silicon. Method for correcting the results of measuring the current-voltage characteristic (IEC 891-87): GOST 28976-91. – [Enter. 19.04.91]. - M.: IPK Standards Publishing House, 2004. - 42 p. – (National standard of Russia).
8. Alferov Zh. I., V. M. Andreev, M. B. Kagan. // Physics and technology of semiconductors, 1970. - V. 4. - 400 p.
9. Andreev V. M. Photoelectric conversion of concentrated solar radiation / Andreev V. M., Grilikhes V. A., Rumyantsev V. D. - L: Nauka, 1989. - 405 p.
10. Photoelectric devices. Part 1. Measurement of photovoltaic current-voltage characteristics (IEC 904-1-87): GOST 28977-91. [Intro. 19.04.91]. - M.: IPK Standards Publishing House, 2004. - 56 p. – (National standard of Russia).
11. Andreev V. M. Photoelectric converters of concentrated solar radiation based on heterostructures. Photodetectors and photoconverters / V. M. Andreev, V. D. Rumyantsev; ed. Zh. I. Alferova, V. Shmartsova. - L .: Nauka, 1980. - S. 201 - 204.
12. Wolf M. Silicon solar cells / M. Wolf. – Solar energy; per. from English. - M.: Mir, 1999. - S. 195 - 231.
13. Andreev V. M. Photoelectric conversion of concentrated solar radiation / Andreev V. M., Grilikhes V. A., Rumyantsev V. D. - L: Nauka, 1989. - 405 p.
14. Grigorash O.V. Non-traditional autonomous sources of electricity / O.V. Grigorash, Yu. I. Strelkov // Industrial Energy, No. 4, 2001, pp. 37-40.
15. Luxmeter Yu-116 // Measuring devices for electrical laboratories URL: http://pribori.net.ua/U116.html.
16. Functioning of the relay protection of the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol, analysis of incorrect operation and methods for its elimination. Balla, V.S. Skopinsky, I.V. Simonov, E.V. Novak, B.O. Lenivenko / Power plants and technologies. - Sevastopol, Sev GU. - 2020. Vol. 6. No. 4.
17. Regulating effect of the frequency load. Influence

on the structure of automatic frequency unloading // I.S. Dyachenko, M.D. Peryshkin, E.V. Novak, B.O. Lenivenko, T.A. Lvov / Power plants and technologies. - Sevastopol, Sev GU. - 2020. Vol. 6. No. 4.
18. Kuvshinov V.V., etc. Alternative energy. Textbook for universities ed. - M: Sputnik + Publishing House, 2020. - 204 p.
19. Volynsky B.A., Zein E.N., Shaternikov V.E. Electrical engineering. Textbook for universities ed. Moscow: Energoatomizdat, 1987.
20. Semenov B.Yu. Power electronics: from simple to complex. M.: SOLON-Press, 2005.
21. Semenov B.Yu. Power electronics: professional solutions. M.: SOLON-Press, 2011.
22. V. V. Kuvshinov, N. V. Morozova, and I. Yu. Power plants based on renewable energy sources Tutorial. - M: Sputnik + Publishing House, 2018. - 277 p.
23. Yakimov V.A. Application of solar energy. Teaching method. allowance ed. Sevastopol: SNUYaEiP, 2009.

УДК 62-83(075.8)

# Безударный пуск асинхронных электроприводов пофазным подключением двигателя к сети

Н.М. Шайтор[1], А.В. Горпинченко[2]
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская,33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]shaytor1950@mail.ru, [2]AVGorpinchenko@sevsu.ru*

Статья поступила 10.02.2022 г.; после доработки 14.02.2022 г.

***Аннотация***
*Представлена математическая модель и разработанная электрическая схема асинхронного электропривода, обеспечивающая установленные условия безударного пуска.*

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

# Shockless start of asynchronous electric drives by phase connection of the motor to the mains

N.M. Shaytor[1], A.V. Gorpinchenko[2]
*Sevastopol State University,33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.*
*[1]shaytor1950@ mail.ru, [2]AVGorpinchenko@sevsu.ru*

Received 10.02.2022 y.; received in final form 14.02.2022 y.

***Abstract***
*A mathematical model and a developed electrical circuit of an asynchronous electric drive are presented, providing the established conditions for shock-free start.*

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

## Введение

Самый распространенный метод пуска асинхронного двигателя (АД) с короткозамкнутым ротором - прямой пуск. При этом АД с короткозамкнутым ротором развивает высокий пусковой вращающий момент с относительно малым временем разгона. Этот метод обычно используется для двигателей малой и средней мощности, которые достигают номинальной частоты вращения за короткое время [1].

Серьезной проблемой асинхронного электропривода прямого пуска является наличие в двигателях ударных знакопеременных моментов электромагнитного происхождения, которые повышают уровень вибраций и снижают надежность привода.

Важной научной и практической задачей является разработка обоснованных способов и технических средств пуска асинхронных двигателей, исключающие появление знакопеременных моментов электромагнитного происхождения [2].

Решение указанной проблемы начато в работах [3-6], где показано, что появление динамических моментов в асинхронных электроприводах прямого пуска связано с особенностями электромагнитных переходных процессов в асинхронных двигателях.

Значительное преимущество при прямом пуске имеют бесконтактные пускатели, построенные на тиристорах и симисторах [4]. Очевидно,

что вследствие высокого быстродействия бесконтактные пускатели могут управлять динамическими характеристиками и осуществлять управление пуском электропривода. Данная публикация посвящена решению той части общей проблемы, которая связана с разработкой математической модели и определения условий безударного пуска двигателя.

## Постановка задачи исследования

Задачей исследования является анализ приведенных зависимостей электромагнитного момента от параметров двигателя и параметров трехфазной системы напряжений и разработка метода управления скоростью изменения магнитного потока влиянием на переходную составляющую тока намагничивания. Такой метод предполагает соблюдение определенной детерминованной последовательности подключения к сети фаз электродвигателя.

## Разработка математической модели и установление условий безударного пуска двигателя

Разнообразие способов управления динамическими характеристиками асинхронных двигателей определено неоднозначными связями мгновенных значений электромагнитного момента двигателя M с его угловой скоростью ωr и параметрами двигателя Z, значениями и характером трехфазной системы питающих напряжений u, а также с производными этих величин и их начальных значений:

$$M = f\left(\omega_r; \frac{d\omega_r}{dt}; \omega_r(0); z; \frac{dz}{dt}; z(0); u; \frac{du}{dt}; u(0)\right)$$

При включении фаз двигателя под синусоидальное напряжение

u = Um sin (ωt + α),

где α - фаза включения по напряжению, ток переходного процесса получают в виде суммы двух слагаемых:

$i = i' + i'' = i' + A \cdot e^{-\frac{r}{L}t} = i' + A \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$ ,

где τ = Lц / rц – постоянная времени цепи; Lц – индуктивность цепи; rц – активное сопротивление; A – постоянная интегрирования.

Первое слагаемое является установившимся (вынужденным) током

$i' = \frac{U_m}{z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_ц)$,

где φц - фаза включения по току.

Второе слагаемое i" - переходная (свободная) составляющая тока включения.

Из нулевого начального условия (до включения в цепь, тока не было), i(0)=0, находят постоянную интегрирования A, положив t = 0:

0 = Im sin (α – φц) + A или A = – Im sin (α – φц),

где Im = Um / z - амплитуда фазного тока,

$z = \sqrt{r_ц^2 + (\omega L_ц)^2}$ - полное сопротивление фазы.

С учетом найденного выражения для постоянного интегрирования A получают уравнение тока в виде:

$i = Im \sin(\omega t + \alpha - \varphi_ц) - Im \sin(\alpha - \varphi_ц) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$

Из данного уравнения видно, что начальное значение апериодического переходного тока

i"(0) = ia0 = – Im sin (α – φц)

зависит от фазы включения по напряжению α.

Если фаза включения α = φц + π/2, то

α – φц = π/2 , и начальное значение апериодической составляющей тока дает наибольшее возможное значение, равное амплитуде устойчивого тока короткого замыкания i" = Im.

Подключение двух фаз в такой неблагоприятный момент времени приводит к образованию в машине двух составляющих магнитного потока: пульсирующего потока от постоянного тока i' и неподвижного магнитного потока от апериодического тока i". Каждый из этих магнитных потоков создает соответствующий электромагнитный момент.

Пульсирующая переходная составляющая момента накладывается на постоянную составляющую, образованную вынужденными составляющими тока и магнитного потока ротора. Совместное действие переходной и постоянной составляющих создает ударный знакопеременный переходный электромагнитный момент.

Включение третьей фазы, оставшейся в максимуме фазного напряжения, рассматривают аналогично. Если включение происходит в момент времени α = φц, то апериодическая составляющая тока i" = 0, режим цепи устанавливается без образования апериодической составляющей, получающей положительный момент времени для включения.

## Электрическая схема безударного пускателя

В бесконтактном пускателе пофазного безударного пуска, рис. 1, симисторний коммутатор VS1 - VS3 осуществляет пофазне подключения двигателя к сети в заданной фазе напряжений, после чего главными контактами КМ1.3 контактор

шунтирует симисторы, а вспомогательным контактом КМ1.2 снимает питание с цепей управления симисторами.

Фазовое управление бесконтактным пускателем заключается в следующем. При нажатии кнопки SB1 ”пуск” управляющий сигнал подается через делитель напряжения R1R3 на вход 4 компаратора DA1. На второй вход компаратора 3 напряжение поступает через делитель и интегрирующую цепочку R2C1. Интегрирующая цепочка формирует сдвиг фаз между напряжением $U_1$ первого входа 4 и напряжением $U_2$ второго входа 3. Эпюры напряжений, поясняющие работу схемы, приведены на рис. 2. Резистор R4 служит для регулировки сдвига фазы напряжения $U_2$ относительно напряжения $U_1$ (формирование задержки).

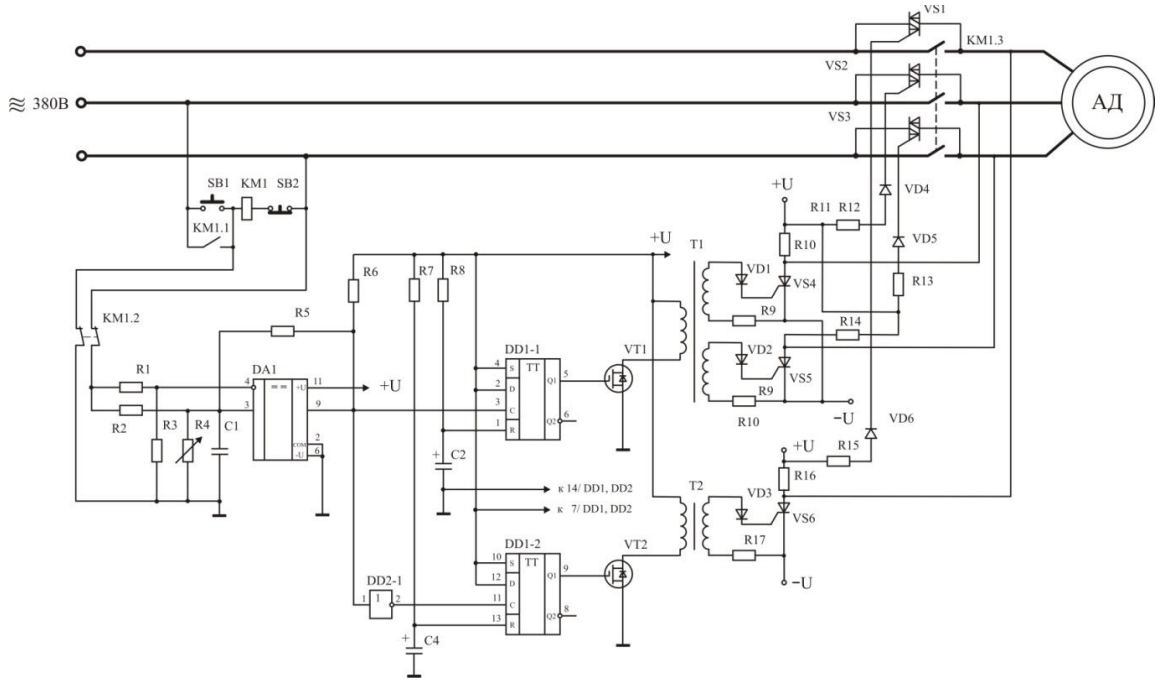



**Рис. 1.** Принципиальная электрическая схема бесконтактного пускателя.

При росте UBX = U1 в момент времени от 0 до t1 напряжение U2 будет меньше напряжения U1, при этом напряжение на выходе компаратора 9 будет равно нулю. После достижения напряжения U1 максимума, она будет уменьшаться. В момент времени t1 напряжение U2 станет больше U1, при этом на выходе компаратора 9 установиться единичный сигнал. Этот сигнал (положительный фронт) поступает на тактовый вход 3 триггера DD1-1, при этом его выход 5 устанавливается в единичное состояние, что является сигналом открытия транзистора VT1, тиристоров VS4 и VS5, и симисторов VS2 и VS3. Этот же единичный сигнал поступает на вход инвертора DD2-1 и его выход устанавливается в нулевое состояние, на выходе 9 триггера DD1-2 сигнал также остается в нулевом состоянии.

В момент времени t2 напряжение U2 на входе компаратора 3 станет меньше напряжения U1 на входе компаратора 4, при этом компаратор переключается и на его выходе 9 устанавливается нулевое состояние, на выходе инвертора DD2-1 устанавливается единичный сигнал, поступающий на вход 11 триггера DD1-2. При этом на выходе триггера 9 так же устанавливается единичный сигнал, являющийся сигналом открытия транзистора VT2, тиристора VS6 и симистора VS1.

Резистор R6 служит для согласования выхода компаратора ТТЛ с уровнем сигнала (выход компаратора - открытый коллектор). Цепочка R8C2 и R7C3 служат для удержания выхода триггера DD1-1 и DD1-2 в нулевом состоянии при подаче питания на схему. Для исключения "дребезжания" компаратора при его переключении на низкой частоте из-за влияния наводок и помех, в схему введен резистор R5, создающий гистерезисную обратную связь.

На рис. 3. показаны расчетные осциллограммы переходных процессов в двигателе АМШ-70-6 при прямом (а) и пофазном (б) подключении к сети. Расчетные осциллограммы практически совпадают с результатами экспери-

ментальных исследований, расхождение расчетов и экспериментов не превышает 15 процентов.

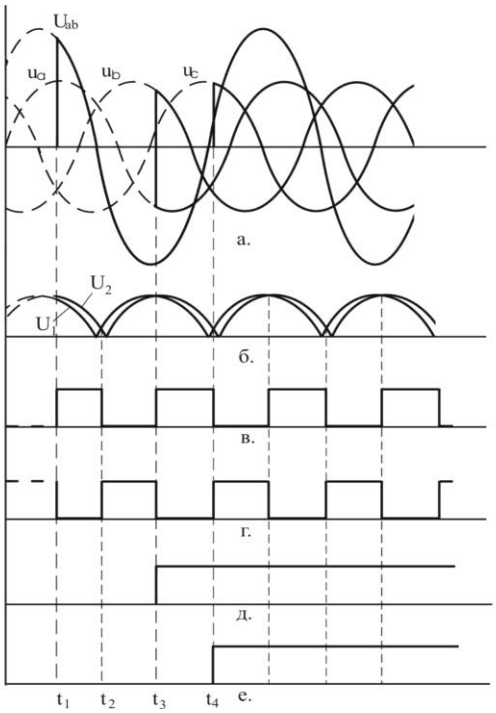



**Рис. 2.** Эпюры напряжений, поясняющие работу схемы бесконтактного пускателя: а - линейное и фазное напряжения сети; б - вход компаратора напряжения DA1; в - выход компаратора напряжения DA1; г - выход инвертора DD2-1; д - выход триггера DD1-2; е - выход триггера DD1-1.

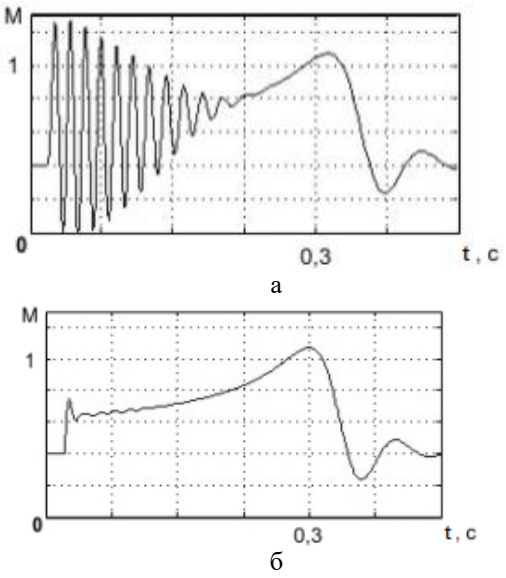



**Рис. 3.** Осциллограммы электромагнитных моментов двигателя АМШ-70-6: а - прямой пуск; б - пуск при пофазном включении.

## Заключение

Осциллограммы наглядно показывают, что при пофазном пуске переходные знакопеременные моменты практически отсутствуют, что приводит к снижению пусковой нагрузки и вибраций электрического привода. Полупроводниковый коммутатор может быть использован как дополнительный блок к уже имеющимся пусковым станциям. Данный блок по своим массогабаритным показателям на порядок меньше контактного пускателя и может быть установлен во время ремонта и модернизации электрооборудования.

Для реверсивного электропривода (сложные металлорежущие станки, подъемно-транспортные устройства, экскаваторы, роботы-манипуляторы и пр.), работающего в повторно-кратковременном режиме с частыми пусками, замена электромагнитных пускателей на бесконтактные обосновано высокой надежностью последних. Поэтому разработка малогабаритных, надежных реверсивных бесконтактных пускателей мощностью до 25 кВт позволит решить проблему повышения эффективности современных электроприводов, работающих в строительстве, транспортной сфере, на обрабатывающих предприятиях, в сельском хозяйстве.

## Список литературы

1. Пантель О.В. Влияние отрицательных последствий прямого пуска асинхронного двигателя на двигатель, рабочий механизм и питающую сеть // Academy. 2015. № 2 (2). С. 14-15.
2. Шайтор Н.М., Горпинченко А.В. Динамические режимы асинхронных двигателей в приводах энергетических систем и комплексов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова, 2020. – Т. 23, № 4. – С.95-101.
3 Петров Л.П. Асинхронный электропривод с тиристорными коммутаторами – М.: Энергия, 1970. -154 с.
4 Шайтор Н.М., Назаренко К.В. Автоматизированные электроприводы // Севастополь: Академия ВМС им. П.С. Нахимова, 2003. - 130 с.
5. Макаров В.Г. Актуальные проблемы асинхронного электропривода и методы их решения //Вестник Казанского технологического университета, 2011. – № 6, – С. 79-92.
6. Шайтор Н.М., Якимович Б.А. Горпинченко А.В., Соломенникова С.А. Влияние тепловых и электромагнитных процессов в двухслойных роторах на эффективность асинхронных двигателей // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова,

2021. Т. 24. – № 2. – С. 114 – 123.

## References

1. Pantel O.V. Influence of negative consequences of direct start of an asynchronous motor on the motor, the working mechanism and the supply network // Academy. 2015. No. 2 (2). pp. 14-15.
2. Shaitor N.M., Gorpinchenko A.V. Dynamic modes of asynchronous motors in drives of power systems and complexes // Bulletin of M.T. Kalashnikov IzhSTU, 2020. - Vol. 23, No. 4. - pp.95-101.
3. Petrov L.P. Asynchronous electric drive with thyristor switches -M.: Energiya, 1970. -154 p.
4. Shaitor N.M., Nazarenko K.V. Automated electric drives // Sevastopol: Naval Academy named P.S. Nakhimov, 2003. - 130 p.
5. Makarov V.G. Actual problems of asynchronous electric drive and methods of their solution //Bulletin of Kazan Technological University, 2011. No. 6, pp. 79-92.
6. Shaitor N.M., Yakimovich B.A. Gorpinchenko A.V., Solomennikova S.A. Influence of thermal and electromagnetic processes in two-layer rotors on the efficiency of asynchronous motors // Bulletin of M.T. Kalashnikov IzhSTU, 2021. Vol. 24. - No. 2. - pp. 114 - 123.

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ЭНЕРГЕТИКЕ

УДК 004.422.81; ББК 30.2-5-05

# Возможности защиты от атак с подбором паролей на основе машинного обучения угроз

А.О. Антонова-Дружинина[2], Е.Е.Смычков[1], А.Е. Смычков[1], А.В.Сагалаев [1], В.А. Луцышен [1]

*[1]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,г. Севастополь, 299053, Россия, smychkov@sevsu.ru*
*[2]ФГБОУ ВО Ростовский государственный экономический университет (РИНХ) Б. Садовая,69, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россияе-mail: iph7red911@gmail.com*

Статья поступила 26.02.2022 г.; после доработки 07.03.2022 г.

***Аннотация***

*Машинное обучение начинает входить в арсенал хакеров, что открывает новые окна возможностей для потенциального нанесения ущерба. Многие из современных мер по защите процедур аутентификации не справляются со сложными атаками с подбором пароля.*

*В статье приведены рекомендации по защите приложений от современных атак с использованием алгоритмов машинного обучения, основанных на подборе паролей.*

*Ключевые слова:* password brute force, generative adversarial network, keylogger, captcha, password generation requirements.

# Protection against machine learning-based password guessing attacks

A.O. Antonova-Druzhinina[2], E.E. Smychkov[1], A.E. Smychkov[1], A.V. Sagalaev, V.A. Lutsyshen

*[1,2]Sevastopol State University, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia,* m.i.ozhiganova@sevsu.ru
*[3]Rostov State Economic University (RINH),, 69B. Sadovayast, Rostov-on-Don, 344002, Russia e-mail: iph7red911@gmail.com*

Received 26.04.2021 y.; received in final form 28.04.2021 y.

***Abstract***

*This article presents a program for automating the selection of measures to ensure the safety of a CII facility of the corresponding category of significance of the Russian Federation. The development environment for this software product was developed by JetBrains based on IntelliJ IDEA PyCharm for the Python programming language. The work of the program is provided by the libraries pyqt5, python-docx-template's, pyinstaller, openpyxl. As a result of the program, the critical information infrastructure object is assigned a category of final significance, on the basis of which the composition of measures to ensure the safety of the CII object of the corresponding category of significance is formed.*

*Keywords*: Critical information infrastructure (CII), categorization, automation, significant object, composition of measures to ensure the safety of a significant object

## Введение

Препятствие несанкционированному доступу – одна из задач специалиста по информационной безопасности. При атаке информационной системы методом перебора атакующий, перебирая значения учетных записей или паролей,

или, например, сессионных данных, создаёт ситуацию, которая позволит ему получить доступ к данным этой системы. Машинное обучение значительно упрощает эту работу, делая атаку более быстрой и совершенной. Поскольку брутфорс-атака нацелена на множественный перебор паролей, следовательно, высока вероятность получения большое количества пакетов за небольшой промежуток времени [1].

## Постановка задачи

В данной статье необходимо рассмотреть типы атак с подбором пароля на основе машинного обучения иобосновать положение о том, что для наиболее эффективной защиты объекта необходимо использовать комплексныеметоды по защите приложений от современных атак с использованием информатизации алгоритмов машинного обучения, основанных на подборе паролей.

## Типы атак с подбором пароля на основе машинного обучения

Атаки перебора паролей (brute-force).

Программное обеспечение для подбора паролей, такое как John theRipper и HashCat, способно перебирать пароли по сохраненному хэшу, и поддерживает различные алгоритмы хеширования, в том числе позволяет автоматически определять используемый криптографический алгоритм. Кроме стандартной атаки перебора паролей, так же поддерживаются атаки по словарю. Самым главным свойством подобных атак является установка большого количества соединений в короткий промежуток времени за которыми следуют пакеты, отвечающие лишь за передачу учётных данных. Стоит обратить внимание также на то, что один порт может участвовать сразу в нескольких соединениях. Прекращение соединения происходит строго после перебора всех паролей и логинов с помощью задействованных портов. [2].

Чтобы преодолеть эту проблему, была разработана платформа для подбора паролей под названием PassGAN [3]. Данный подход является инновационным, потому что основан на обучении генеративной состязательной сети (Generativeadversarialnetwork - GAN), которая способна создавать пароли, угадываемые искусственным интеллектом, с гораздо более высокой точностью и скоростью.

Исследователи протестировали PassGAN на двух больших базах данных украденных паролей и обнаружили, что их нейронная сеть генерирует пароли лучше, чем существующие инструменты для подбора паролей, даже без каких-либо предварительных знаний о структуре паролей. Кроме того, когда они объединили PassGAN с HashCat, точность подбора пароля на основе машинного обучения выросла на 51-73 процента.

Еще один пример атаки методом перебора пароля с использованием нейронных сетей недавно провела группа исследователей, которые обучили модель машинного обучения наиболее распространенным паролям. Они использовали рекуррентную нейронную сеть с долгой кратковременной памятью (Long short-termmemory - LSTM) [4] и обучили ее миллиону скомпрометированных паролей. В результате система смогла сгенерировать пароли, которых не было в исходных данных.

Эти исследования подчеркивают важность двухфакторной аутентификации. Однако даже двухфакторная аутентификация не является панацей для защиты от атак хакеров, которые используют алгоритмы машинного обучения.

Атаки кейлоггеров.

Двухфакторная аутентификация позволяет пользователям подтвердить свою личность с помощью одноразового кода, отправленного на специальное устройство. Однако и этот код может быть украден злоумышленниками, которые используют информацию с сенсоров мобильных телефонов. PINlogger — это новый способ подбора паролей с помощью нейронной сети и алгоритмов машинного обучения для подбора PIN-кода, введенного на мобильном устройстве.

Наши мобильные устройства оснащены различными сенсорами, включая сенсорные экраны, акселерометры и гироскопы. С помощью машинного обучения можно проанализировать ваше взаимодействие с телефоном, чтобы подобрать код, который только что был введен.

Однако эта атака вряд ли будет широко использоваться хакерами, поскольку для этого требуется наличие веб-браузера, с запущенным JavaScript на мобильном устройстве. Кроме того, сенсоры устройства должны быть доступны через веб-API, и пользователю необходимо держать открытой вредоносную веб-страницу для выполнения атаки.

Атаки с обходом капчи.

Многие веб-сайты используют капчу для предотвращения доступа к ним ботов, но благодаря машинному обучению хакеры могут легко обойти эту защиту. Первый пример решения тестов капчи был описан в 2012 году, когда исследователи использовали метод опорных векторов

для взлома капчи с высокой точностью. С тех пор капча стала более сложной, но и машинное обучение с использованием алгоритмов распознавания изображений хакерами стало использоваться гораздо чаще.

Например, в исследовании 2016 года был описан метод взлома капчи с использованием глубокого обучения (deeplearning) с точностью 92% [5]. В ходе исследования был использован набор данных из 10 000 образцов капчи включающей не менее пяти символов с шумовыми эффектами, распознать которую было сложно даже для человека.

Капча с сегментацией изображений считается одним из самых сильных способов защиты веб-сайта от ботов, но другое исследование показывает, что эта защита уязвима для распознавания изображений на основе глубокого обучения.

Распознавание звука при нажатии клавиши.

Помимо подбора паролей с использованием сложных математических алгоритмов, машинное обучение также позволяет хакерам красть ваши пароли, прослушивая звук, который издает клавиатура при нажатии клавиш. В 2017 году разработчиками было продемонстрировано приложения для слежки за пользователями Skype: Skype-Type [5].

Программа основана на технологии машинного обучения, которая позволяет подбирать пароль, набранный в Skype, анализируя звуки клавиш ноутбука.

Но алгоритм перехвата паролей программы не идеален и может столкнуться с трудностями, которые возникают из-за фоновой музыки или других побочных звуков.

Схема обнаружения атаки с подбором пароля.

Существует высокий риск того, что ваши учетные записи однажды могут быть скомпрометированы. Поэтому надо быть готовым в режиме реального времени обнаруживать и реагировать на подобного рода атаки. Вот список наиболее распространенных признаков того, что ваше веб-приложение подвергается атаке с подбором пароля:

- увеличение числа неудачных попыток аутентификации из-за того, что хакеры пытаются использовать расположенные в алфавитном порядке имена пользователей и пароли;
- пользователь пытается войти в систему с нескольких разных IP-адресов;
- многочисленные неудачные попытки входа с одного IP-адреса;
- попытки входа в систему с популярными паролями, такими как qwerty, password или 123456;
- один из пользователей вызывает чрезмерное потребление ресурсов сети передачи данных;
- было изменено большое количество паролей или созданы новые учетные записи пользователей;
- множество записей в журнале, которые включают попытки ошибочных аутентификаций за короткий промежуток времени и подозрительные сетевые подключения;
- изменения в поведении веб-приложений, которые могут заключаться в медленной загрузке, увеличении сетевого трафика или перенаправлении на другую страницу или веб-сайт.

## Рекомендации по защите от атак с подбором пароля

Когда вы знаете, что хакеры способны реализовать атаку подбора паролей с помощью методов машинного обучения, становится ясно, что для защиты необходимо использовать только передовые методы обеспечения безопасности веб-приложений. Ниже указан список из восьми рекомендаций о том, как защититься от атак с подбором паролей.

*Требования к созданию паролей.*

Принимая во внимание существующие угрозы, Лабораторией Касперского выпущены рекомендации по созданию надежного пароля. В соответствии с этими рекомендациями предлагается использовать пароли, состоящие из 10-12 символов или более, избегать простых последовательностей, включать в пароль разнотипные символы и проверять свой пароль на наличие его в базах данных украденных паролей.

Например, Facebook и Twitter собирают украденные учетные данные, которые были опубликованы в открытом доступе, и предотвращают повторное использование одних и тех же комбинаций паролей и имен пользователей.

*Защита привилегированных пользователей*

Привилегированные пользователи наиболее уязвимы для атак с подбором паролей, поскольку они обычно имеют доступ к огромному количеству конфиденциальных данных. Таким образом, вы должны предоставить привилегированным пользователям другой URL-адрес для входа в веб-приложение, а также блокировать подобные учетные записи в случае выявления

атак и, возможно, использовать технологию единого входа. Необходимо использовать белые списки доступа и настроить прогрессивные задержки в случае неудачных попыток аутентификации.

*Применение многофакторной аутентификации*

Применяйте, как минимум, двухфакторную аутентификацию, особенно для пользователей, которые подключаются удалённо. Двухфакторная аутентификация требует ввода уникального кода, отправленного на мобильный телефон. Или используйте персональные USB-токены. Другим распространенным подходом к аутентификации являются одноразовые пароли, с ограниченным сроком службы.

*Шифрование паролей*

Хеширование паролей или одностороннее шифрование сейчас довольно популярно, но в то же время необходимо помнить, что злоумышленник может украсть саму базу паролей, если она не защищена. Для безопасного хранение и передачи паролей ваших пользователей по сети можно рассмотреть возможность внедрения сквозного шифрования паролей.

*Маскировка паролей*

Придерживаясь рекомендаций по защите паролей, в современном программном обеспечение на экране не должны отображаться пароли в открытом виде. Безопасность вводимых символов обеспечивают звездочки (*) на дисплее, за которыми скрывается пароль. Но нельзя забывать, что хакеры с помощью программ кейлогеров могут отслеживать нажатия клавиш и, таким образом, скомпрометировать пароль.

*Воздержитесь от обязательной смены пароля*

Ведутся жаркие дискуссии о том, эффективно ли принудительно регулярно менять пароль. Ранее считалось, что в парольной политике необходимо требовать регулярную смену паролей пользователями, но в последствии были обнаружены проблемы в этой концепции. При регулярной смене паролей, пользователи, как правило, создают слабые пароли. Связано это с тем, что при частой смене паролей, пользователи стараются сделать его максимально простым для запоминания и ввода, хотя требования к паролям они выполняют. По итогу, можно предположить, что сложный и достаточно длинный пароль, который надо запомнить один раз, будет надежнее, нежели принцип его регулярной смены.

*Повышение сложности паролей с помощью машинного обучения*

Алгоритмы машинного обучения могут помочь в проверке сложности паролей и даже сгенерировать для пользователей максимально безопасные пароли. Это очень эффективный подход для защиты от современных атак с подбором пароля. Но для разработки таких систем требуется опытная команда со специальными знаниями и навыками.

*Расширенные методы аутентификации*

В то время как технологии становятся все более сложными и широко распространенными, многие пользователи пришли к выводу, что пароли имеют много недостатков и могут быть легко украдены. Расширенные механизмы аутентификации означают переход от аутентификации, основанной на том, что знают пользователи, к аутентификации, основанной на том, кто они и как они себя ведут.

Одним из инновационных подходов является использование биометрии для аутентификации пользователей. Биометрические технологии не требуют запоминания сложных паролей. Вместо этого пользователи проходят аутентификацию, позволяя системе распознавать их отпечатки пальцев, голоса, радужную оболочку глаза или лицо.

Другой подход к аутентификации пользователей основан на поведении человека. Это, так называемая, поведенческая биометрия. В этом случае система следит за действиями пользователя, а затем создает уникальный профиль того, как этот пользователь, например, печатает или использует мышку.

## Заключение

Атаки по подбору паролей с использованием технологии машинного обучения – это новая угроза которой сложно противостоять. Обучение сети на основании реальных данных о паролях, которые, в свою очередь, собраны при взломах информационных систем, не является большой сложностью. Учитывая регулярную публикацию в сети баз паролей от взломанных аккаунтов, использование машинного обучения для подбора пароля к интересующему объекту, становится очень привлекательным для злоумышленников. Этот тип атаки требует инновационных методов защиты и оперативного реагирования. Приведенные в статье рекомендациb позволят избежать компроментации информационной системы и позволят сохранить данные.

## Список литературы


1. Ожиганова М. И., Куртаметов Э. С. Применение машинного обучения в защите веб-приложений //NBI-technologies. – 2020. – Т. 14. – №. 2. –С. 16-20.
2. Пилькевич, П. В. Голиков, С.Е. Луцышен, В.А. Ожиганова М.М. Исследование аномалий сетевой активности на основании эвристического анализа трафика //Modern Science. – 2021. – №. 6-1. С. 578-584
3. Нейросеть научили взламывать пароли миллионами. [Электронный ресурс]. URL: https://www.iksmedia.ru/news/5438928-Nejroset-nauchili-vzlamyvat-paroli.html(дата обращения: 20.01.2022).
4. LSTM – сети долгой краткосрочной памяти. [Электронный ресурс]. URL:https://habr.com/ru/company/wunder-fund/blog/331310/ (дата обращения: 12.01.2022).
5. Don'tSkype&Type! [Электронный ресурс]. URL: https://github.com/SPRITZ-Research-Group/Skype-Type(дата обращения: 14.01.2022).
6. Using deep learning to break a Captcha system. [Электронныйресурс]. URL: https://deep-mlblog.wordpress.com/2016/01/03/how-to-break-a-captcha-system/ (дата обращения: 31.01.2022).


## References


1. Ozhiganova M. I., Kurtametov E. S. Application of machine learning in the protection of web applications // NBI-technologies. - 2020. - T. 14. - No. 2. - S. 16-20.
2. Pilkevich, P.V. Golikov, S.E. Lutsy-shen, V.A. Ozhiganova M.M. Investigation of network activity anomalies based on heuristic traffic analysis //Modern Science. – 2021. – no. 6-1. pp. 578-584
3. The neural network was taught to crack millions of passwords. [Electronic resource]. URL: https://www.iksmedia.ru/news/5438928-Nejroset-nauchili-vzlamyvat-paroli.html (date of access: 01/20/2022).
4. LSTM - networks of long short-term memory. [Electronic resource]. URL: https://habr.com/ru/company/wunder-fund/blog/331310/ (date of access: 01/12/2022).
5. Don'tSkype&Type! [Electronic resource]. URL: https://github.com/SPRITZ-Research-Group/Skype-Type (accessed 01/14/2022).
6. Using deep learning to break a Captcha system. [Electronic resource]. URL: https://deep-mlblog.wordpress.com/2016/01/03/how-to-break-a-captcha-system/ (accessed 01/31/2022).

УДК 621.039.5:699.841:624.042.8

# Методы интеллектуального анализа данных для решения задач информационной безопасности

А.Е. Смычков[1], Е.Е. Смычков[1], Е.А Контылева[1], В.В. Пелись[1], А.В. Сагалаев[1]
*[1]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия,eakontyleva@sevsu.ru*

Статья поступила18.02.2022 г.; после доработки 01.03.2022 г.

***Аннотация***

*Большой объем данных, генерируемый разнообразными источниками в повседневной жизни, представляет собой большую возможность для развития и прогресса во многих областях: научных исследованиях, социальной жизни и информационной безопасности. Одновременно с этим анализ больших массивов является сложной задачей, потому что перегруженность информацией может снизить нашу способность считывать и понимать данные. Что в свою очередь затруднит поиск полезной информации. В этой статье рассмотрены методы интеллектуального анализа данных в целях обнаружения вредоносных программ.*

*Ключевые слова:*классификация, кластеризация, интеллектуальный анализ данных, открытие знаний, машинное обучение.

# The use of data mining methods in information security solutions

E.E. Smychkov[1], A.E.Smychkov[1], E.A. Kontyleva[1], V.V. Pelis[1], A.V. Sagalaev[1]
*[1]Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, eakontyleva@sevsu.ru*

Received 18.02.2022 y.; received in final form 01.03.2022 y.

***Abstract***

*The large amount of data generated by various sources in everyday life is a great opportunity for development and progress in many areas: scientific research, social life and information security. At the same time, analyzing large arrays is challenging because information overload can reduce our ability to read and understand data. Which in turn makes it difficult to find useful information. This article discusses data mining techniques for malware detection.*

*Keywords:*classification, clustering, data mining, knowledge discovery, machine learning.

## Введение

На протяжении последних нескольких десятков лет наблюдается тенденция минимизации участия человеческого фактора в различных процессах информационной безопасности, что связано с особой ролью человеческого фактора [1]. Машинное обучение значительно упрощает работу как по защите информационных систем, так и в случае организации атаки на неё [2, 3]. Предлагаемый к рассмотрению интеллектуальный анализ данных – это процесс выявления закономерностей в больших массивах данных.

Методы интеллектуального анализа данных широко используются в научных исследованиях (для обработки больших объемов необработанных научных данных), а также в бизнесе, в основном для сбора статистических данных и информации, применяемой для совершенствования стратегии взаимоотношения с клиентами.

Интеллектуальный анализ данных является полезным инструментом в области информационной безопасности для обнаружения уязвимостей и сбора индикаторов для базового анализа.

## Постановка задачи

В данной статье необходимо проанализировать потенциал использования интеллектуального анализа как инструмента обнаружения вредоносных программ. Определить преимущества использования методов интеллектуального анализа данных для обнаружения вредоносного программного обеспечения. Будет рассмотрена роль интеллектуального анализа данных в информационной безопасности и процессе обнаружения вредоносных программ.

## Процесс интеллектуального анализа данных

Интеллектуальный анализ данных – это процесс, который включает анализ информации, прогнозирование тенденций и принятие превентивных решений на основе больших массивов данных.

Термин «Интеллектуальный анализ данных» обычно рассматривается как синоним «Обнаружения знаний в базах данных» (KnowledgeDiscoveryinDatabases), на самом деле это всего лишь один из этапов этого процесса. Основной целью «обнаружения знаний в базах данных» является получение полезной и зачастую ранее неизвестной информации из больших массивов данных.

Весь процесс «обнаружения знаний в базах данных» включает в себя четыре этапа:

- предварительная обработка – отбор, очистка и интеграция данных;
- преобразование – преобразование информации и ее консолидация в формы, подходящие для добычи информации;
- добыча информации – сбор, извлечение, анализ и статистическая обработка данных;
- оценка закономерностей – выявление новых и необычных закономерностей и представление результатов анализа данных.

Интеллектуальный анализ данных помогает находить новые интересные закономерности, извлекать скрытую (но полезную и важную) информацию и выявлять необычные записи и зависимости в больших базах данных. Для получения полезной информации при интеллектуальном анализе данных используются статистические методы, машинное обучение, искусственный интеллект (ИИ) и системы баз данных [4].

## Методы интеллектуального анализа данных

Для анализа больших данных используется множество методов, но наиболее распространенными являются следующие восемь:

- ***ассоциативные правила*** помогают находить возможные связи между переменными в базах данных, обнаруживать скрытые закономерности и идентифицировать переменные и частоту их появления;
- ***классификация*** разбивает большой набор данных на заранее определенные классы или группы;
- ***кластеризация*** помогает идентифицировать данные, имеющие схожие характеристики, и выявлять сходства и различия между ними;
- ***метод дерева принятия решений*** создает классификационные и регрессионные модели в виде древовидной структуры;
- ***метод нейронных сетей*** используется для моделирования сложных взаимосвязей между входными и выходными данными и обнаружениянових закономерностей;
- ***регрессионный анализ*** используется для прогнозирования значения одного элемента на основе известныхзначенийдругих элементов в наборе данных путем построения модели взаимосвязи между зависимыми и независимыми переменными;
- ***статистические методы*** помогают находить закономерности и строить прогностические модели;
- ***визуализация*** обнаруживает новые закономерности и показывает результаты в понятной для пользователей форме.

Можно применять один или несколько методов интеллектуального анализа данных для создания эффективной системы, которая обеспечит успешное обнаружение атак [5].

Далее подробнее рассмотрим, как можно использовать интеллектуальный анализ данных для решений в области кибербезопасности.

## Интеллектуальный анализ данных в целях обнаружения вредоносных программ

Интеллектуальный анализ данных является одним из четырех методов обнаружения, используемых сегодня для обнаружения вредоносных программ. Три других – это сканирование, мониторинг активности и контроль целостности.

При создании приложений для обеспечения безопасности разработчики используют методы интеллектуального анализа данных для повышения скорости и точности обнаружения вредоносных программ, а также для обнаружения атак

"нулевого дня" [6].

**Стратегия обнаружения вредоносных программ**

Существует три стратегии обнаружения вредоносных программ:

– обнаружение аномалий;
– обнаружение неправильного использования;
– гибридное обнаружение.

***Обнаружение аномалий*** предполагает моделирование нормального поведения системы или сети с целью выявления отклонений от обычных условий эксплуатации.

Основная проблема с обнаружением аномалий заключается в том, что любое отклонение от нормы, даже если это нормальное поведение, будет рассматриваться как аномалия, что приведет к высокому уровню ложных срабатываний.

***Обнаружение неправильного использования***, также известно, как обнаружение на основе сигнатур, идентифицирует только известные атаки на основе примеров их сигнатур. Этот метод имеет более низкую частоту ложных срабатываний, но не может обнаружить атаки «нулевого дня».

***Гибридный подход*** сочетает в себе методы обнаружения аномалий и неправильного использования, чтобы увеличить количество обнаруженных вторжений при одновременном уменьшении числа ложных срабатываний. Он не строит никаких моделей, а вместо этого использует информацию как из вредоносных, так и из легальных программ для создания классификатора – набора правил или моделей обнаружения, сгенерированных алгоритмом интеллектуального анализа данных. Затем система обнаружения аномалий ищет отклонения от нормального профиля, а система обнаружения неправильного использования ищет сигнатуры вредоносных программ в коде программы.

**Процесс обнаружения**

Обнаружение вредоносных программ при использовании интеллектуального анализа данных состоит из двух этапов:

– выделение функций;
– классификация/кластеризация.

На первом этапе различные функции, такие как вызовы API, n-граммы, двоичные строки и поведение программ извлекаются для получения характеристик файлов. Извлечение функций может быть выполнено путем выполнения статического или динамического анализа (с реальным запуском потенциально опасного программного обеспечения или без него). Также может быть использован гибридный подход, сочетающий статический и динамический анализ.

При классификации и кластеризации образцы файлов распределяются по группам на основе анализа признаков.

Для классификации образцов файлов необходимо построить модель классификации (классификатор), используя алгоритмы классификации, такие как RIPPER, DecisionTree (DT - Дерево решений), ArtificialNeuralNetwork (ANN - Нейронная сеть), NaiveBayes (NB - Наивный байесовский классификатор) или SupportVectorMachines (SVM - Метод опорных векторов). Кластеризация используется для группировки образцов вредоносного ПО, имеющих схожие характеристики [7].

Используя методы машинного обучения, каждый алгоритм классификации строит модель, в которой представлены как безопасные, так и вредоносные классы. Обучение классификатора с использованием такой коллекции образцов файлов позволяет обнаруживать даже недавно выпущенные вредоносные программы.

**Интеллектуальный анализ данных для обнаружения вторжений**

Помимо обнаружения вредоносного кода, интеллектуальный анализ данных может эффективно использоваться для обнаружения вторжений и анализа результатов аудита для выявления аномальных зависимостей. Вредоносные вторжения могут подразумевать проникновение в сети, базы данных, серверы, веб-клиенты и операционные системы.

Существует два типа атак вторжения, которые можно обнаружить с помощью методов интеллектуального анализа данных:

– атаки на хост, когда злоумышленник фокусируется на определенной системе;
– сетевые атаки, когда злоумышленник атакует всю сеть.

Для обнаружения атак на хост необходимо проанализировать функции, извлеченные из программ, в то время как для обнаружения сетевых атак необходимо анализировать сетевой трафик. Точно так же, как при обнаружении вредоносных программ, можно искать либо аномальное поведение, либо случаи неправильного использования [7].

## Интеллектуальный анализ данных для обнаружения мошенничества

С помощью методов интеллектуального анализа данных можно обнаружить различные виды мошенничества, от финансового мошенничества до мошенничества с использованием информационно-телекоммуникационных технологий и компьютерных вторжений.

Мошеннические действия могут быть обнаружены с помощью контролируемого и неконтролируемого обучения.

При контролируемом обучении все имеющиеся данные классифицируются как мошеннические или немошеннические. Эта классификация затем используется для обучения модели для обнаружения возможного мошенничества.

Основным недостатком этого метода является его неспособность обнаруживать новые типы атак. Неконтролируемые методы обучения помогают выявлять проблемы с конфиденциальностью и безопасностью данных без использования статистического анализа.

## Плюсы и минусы интеллектуального анализа данных

Использование интеллектуального анализа данных в кибербезопасности позволяет:

- быстрее обрабатывать большие массивы данных;
- создать уникальную и эффективную модель для каждого конкретного случая использования;
- применять методы интеллектуального анализа данных для обнаружения атак «нулевого дня».

Преимущества, казалось бы, неоспоримые. Но также можно выделить определенные недостатки:

- интеллектуальный анализ данных является сложным, ресурсоемким и дорогостоящим;
- создание соответствующего классификатора может оказаться очень сложной задачей;
- потенциально вредоносные файлы необходимо проверять вручную;
- классификаторы необходимо постоянно обновлять, чтобы включать образцы новых вредоносных программ.

Интеллектуальный анализ данных помогает быстро анализировать огромные массивы данных и автоматически обнаруживать скрытые закономерности. Этот факт имеет решающее значение, когда речь идёт о создании эффективного решения для защиты от вредоносных программ, способного обнаруживать ранее неизвестные угрозы.

## Заключение

Интеллектуальный анализ данных обладает большим потенциалом в качестве инструмента обнаружения вредоносных программ. Он позволяет анализировать огромные массивы информации и извлекать из них новые данные.

Основным преимуществом использования методов интеллектуального анализа данных для обнаружения вредоносного программного обеспечения является возможность идентифицировать как известные атаки, так и атаки «нулевого дня».

Однако, поскольку ранее неизвестная, но легитимная активность может быть помечена как потенциально опасная, существует высокая вероятность ложных срабатываний.

## Список литературы

1. Ожиганова М. И., Калита А. О., Тищенко Е. Н. Построение адаптивных систем защиты информации // НБИ ТЕХНОЛОГИИ (NBI-technologies). – Волгоград: 2019. – Т. 13. – №. 4. – С. 12-21. DOI: 10.15688/NBIT.jvolsu.2019.4.2
2. Ожиганова М. И., Куртаметов Э. С. Применение машинного обучения в защите веб-приложений //NBI-technologies. – 2020. – Т. 14. – №. 2. –С. 16-20.
3. Пилькевич, П. В. Голиков, С.Е. Луцышен, В.А. Ожиганова М.М. Исследование аномалий сетевой активности на основании эвристического анализа трафика //Modern Science. – 2021. – №. 6-1. С. 578-584
4. А.А. Барсегян, М.С. Куприянов, В.В. Степаненко, И.И. Холод. Методы и модели анализа данных: OLAP и DataMining. 2004. С. 63-85.
5. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Холод И. И., Тесс М. Д., Елизаров С. И. Анализ данных и процессов: учеб. пособие. СПб : БХВ-Петербург, 2009. 512 с.
6. Adebowale A. An Enhanced Data Mining Based Intrusion Detection System (IDS) using Selective Feedback. September 2013 [Электронный ресурс]. URL: http://ijcit.com/archives/volume2/issue5/Paper020535.pdf, (дата обращения: 16.12.2021).
7. Маккафри Дж. Кластеризация данных с использованием наивного байесовского вывода. [Электронный ресурс], URL: http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/jj991980.aspx, (дата обращения: 08.01.2022).

## References


1. Ozhiganova M. I., Kalita A. O., Tishchenko E. N. Building the reaction of information security systems // NBI TECHNOLOGIES (NBI-technologies). - Volgograd: 2019. - T. 13. - No. 4. - S. 12-21. DOI: 10.15688/NBIT.jvolsu.2019.4.2
2. Ozhiganova M.I., Kurtametov E.S. Application of machine learning in web applications //NBI-technologies. - 2020. - T. 14. - No. 2. -S. 16-20.
3. Pilkevich, P.V. Golikov, S.E. Luchishen, V.A. Ozhiganova M.M. Study of anomalous network activity based on heuristic traffic analysis //Modern Science. – 2021. – no. 6-1. pp. 578-584
4. A.A. Barseghyan, M.S. Kupriyanov, V.V. Stepanenko, I.I. Cold. Methods and models of data analysis: OLAP and DataMining. 2004. S. 63-85.
5. Barseghyan A. A., Kupriyanov M. S., Kholod I. I., Tess M. D., Elizarov S. I. Analysis of data and processes: textbook. allowance. St. Petersburg: BHV-Peterburg, 2009. 512 p.
6. Adebowale A. An Enhanced Data Mining Based Intrusion Detection System (IDS) using Selective Feedback. September 2013 [Electronic resource]. URL: http://ijcit.com/archives/volume2/issue5/Paper020535.pdf, (accessed 12/16/2021).
7. McCaffrey J. Data Clustering Using Naive Bayes Inference. [Electronic resource], URL: http://msdn.microsoft.com/ru-ru/magazine/jj991980.aspx, (date of access: 01/08/2022).

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК. 622.234.42/44:66.023

# Основные факторы, определяющие окислительную активность азотной кислоты при окислении диоксида урана в сернокислых растворах

А.М. Акимов, С.А. Котельникова.
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия,* e-mail*: cvetlana.83@inbox.ru*

Статья поступила 19.01.2022 г.; после доработки 21.01.2022 г.

***Аннотация***

*Рассмотрена реакционная способность азотной кислоты для окисления диоксида урана в сернокислых растворах в зависимости от температуры, концентрации $HNO_3$, времени и редокс-потенциала.*

*Ключевые слова*: азотная кислота, диоксид урана, переработка отвалов уранодобывающих предприятий

# The main factors determining the oxidative activity of nitric acid during the oxidation of uranium dioxide in sulfuric acid solutions

A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova
*Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russiae-mail:cvetlana.83@inbox.ru* )

Received 19.01.2022 y.; received in final form 21.01.2022 y.

***Abstract***

*Reactionary ability of nitric acid for oxidation of dioxide of uranium in sulfate solutions depending on temperature, concentration of $HNO_3$, time and redoks-potential is considered.*

*Keywords:* nitric acid, uranium dioxide, processing of dumps of uranium mining enterprises.

## Введение

Азот в соединениях с кислородом существует в пяти степенях окисления, но окислительные свойства присущи только соединениям, степень окисления азота в которых равна +3, +4, +5.

Ряд азотсодержащих кислот представляют азотная, азотистая и азотноватистая ($H_2N_2O_2$) кислоты. Прочность молекул этих кислот убывает по мере снижения валентности, окислительные свойства присущи лишь двум первым кислотам. Кислотные функции у азотной кислоты выражены сильно: в 0,1 моль/л растворе она диссоциирована приблизительно на 93 %; у азотистой – слабо ($K_d = 4 \cdot 10^{-4}$) и у азотноватистой – весьма слабо ($K_{d1} = 9 \cdot 10^{-8}$, $K_{d2} = 1 \cdot 10^{-14}$).

## Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является исследование факторов, определяющих окислительную активность азотной кислоты при ее взаимодействии с диоксидом урана. Результаты исследования факторов, определяющих окислительную активность азотной кислоты и роль продуктов ее

разложения при гетерогенном окислении урана (IV), могут лечь в основу разработки ряда процессов, имеющих прикладное значение, в частности, при разработке технологии переработки отвалов уранодобывающих предприятий.

В связи с этим задачей исследований явилось определение реакционной способности азотной кислоты для окисления диоксида урана в сернокислых растворах в зависимости от температуры, концентрации азотной кислоты времени и редокс-потенциала.

## Результаты научного исследования

Окислительная активность растворов азотной кислоты, определяется скоростью ее разложения. Поэтому все факторы, способствующие увеличению скорости разложения молекул $HNO_3$, будут одновременно повышать и ее окислительную активность [1].

Рассуждения о том, что азотная кислота является слабым окислителем только в разбавленных растворах, а в концентрированных – это прекрасный окислитель, нельзя считать точными, если учесть, что чистая азотная кислота весьма устойчива к действию многих восстановителей, а концентрированные растворы азотной кислоты всегда содержат азотистую кислоту вследствие наличия в умеренных и крепких растворах равновесий:

$2NO_2 + H_2O \leftrightarrow HNO_2 + HNO_3$;

$NO + NO_2 + H_2O \leftrightarrow HNO_2$;

$2NO + HNO_3 + H_2O \leftrightarrow 3HNO_2$.

Механизм восстановления азотной кислоты исследован во многих работах, обзор которых приведен в [4]. Остановимся лишь на некоторых наиболее поздних публикациях по данному вопросу.

Пржевлоская [2] полярографическим методом установила, что восстановление азотной кислоты на ртутном электроде происходит двумя путями: в сильнокислой среде через образование нитроний-ионов $NO_2^+$, которые затем уже восстанавливаются; в присутствии оксида азота процесс восстановления протекает автокаталитически.

В результате сравнительного изучения окислительной способности растворов $HNO_3$ и $NaNO_3$ в работе [3] было установлено, что окислительная способность азотной кислоты с ростом ее концентрации увеличивается, а нитратов с ростом их концентрации – понижается. Различие в протекании процесса авторы видят в том, что в первом случае в реакции принимают участие оба иона ($H^+$ и $NO_3^-$), во втором – лишь нитрат-ионы, а концентрация $H^+$ при этом снижается. Поскольку стехиометрический коэффициент $H^+ > 1$, эффект окисления уменьшается с ростом концентрации солевых растворов. В серии работ по исследованию механизма электрохимического восстановления азотной кислоты Алексеева с соавторами [4] показали, что скорость этого процесса, прежде всего, определяется концентрацией недиссоциированных молекул $HNO_3$, которые находятся в равновесии с молекулами азотистой кислоты

$HNO_3 + 2H^+ + 2e^- \leftrightarrow HNO_2 + H_2O$,

$E^0 = 0{,}954$ В

и другими компонентами системы:

$HNO_2 + H^+ \leftrightarrow H_2NO_2^+$;

$NO_2OH + H_2NO_2^+ \leftrightarrow N_2O_4 + H^+ + H_2O$.

При исследовании кинетики гомогенной реакции окисления урана (IV) азотной кислотой Колтунов [5], так же, как и многочисленные более ранние исследователи, установил автокаталитический характер процесса для растворов умеренных концентраций и наблюдал сокращение периода индукции с ростом концентрации азотной кислоты. Колтунов объясняет автокаталитический характер реакции образованием азотистой кислоты и последующим окислением урана (IV) последней. Для концентрированных растворов эти же авторы приводят иной механизм:

$U(NO_3)^{3+} + H_2O \rightarrow UO_2^{2+} + H_2NO_2^+$;

$U^{4+} + HNO_2 + H_2O = UO_2^{2+} + HNO + 2H^+$;

$HNO + HNO_3 \rightarrow 2HNO_2$.

Колтунов объясняет механизм реакции окисления урана (IV) участием в роли непосредственного окислителя нитроний-ионов, образующихся по реакции

$$2HNO_3 \leftrightarrow H_2NO_3^+ + NO_3^- \leftrightarrow H_2O + NO_2^+ + NO_3^-.$$

В случае применения азотной кислоты для окисления диоксида урана в сернокислых растворах на холоде ее окислительные свойства заметно проявляются только в области относительно концентрированных растворов $H_2SO_4$ (свыше 1 моля). С возрастанием концентрации азотной кислоты эффективность этого вещества в качестве окислителя повышается (табл.1). Окислительная активность азотной кислоты в зависимости от температуры, так же, как и при повышении концентрации $HNO_3$ и $H_2SO_4$, растет не постепенно, а скачкообразно (рис. 1). Начало энергичного окислительного действия азотной кислоты в указанных условиях соответствует температуре 70 ºС, т.е. температуре, при которой

начинается сильное разложение $HNO_3$ [6].

***Таблица 1.*** *Зависимость степени растворения, %, урана от концентрации серной и азотной кислот*

| Концентрация $H_2SO_4$, моль/л | Степень растворения при концентрации $HNO_3$, моль/л | | | |
|---|---|---|---|---|
| | – | 0,032 | 0,094 | 0,186 |
| 0,05 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| 0,10 | 1,0 | 1,1 | 1,1 | 1,0 |
| 0,26 | 1,0 | 1,1 | 1,0 | 1,8 |
| 0,51 | 0,9 | 1,1 | 1,0 | 3,1 |
| 1,02 | 0,9 | 1,1 | 1,9 | 7,2 |
| 2,04 | 1,0 | 18,0 | 27,0 | 38,0 |

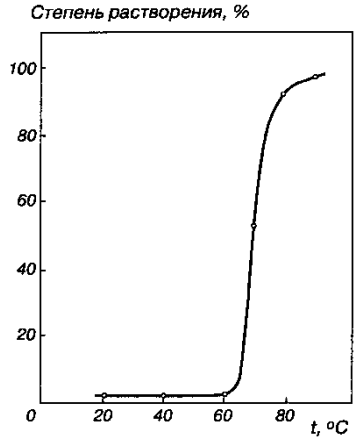



**Рис. 1**. Зависимость степени взаимодействия $UO_2$ и азотной кислоты в $H_2SO_4$ концентрации 10 г/л от температуры

Эти особенности азотной кислоты наиболее естественно объясняются при допущении, что в определенных условиях процесс автокаталитического разложения $HNO_3$ протекает быстро, причем продукты распада представляют собой сильные окислители.

Веттер [6] при исследовании электрохимического восстановления растворов азотной кислоты средней и высокой концентрации сделал вывод о том, что окислительно-восстановительный потенциал Е растворов находится в логарифмической зависимости от концентрации азотистой кислоты. Напротив, Монк и Эллингем [7] полагают, что потенциалопределяющей является реакция

$$HNO_3 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow HNO_2 + H_2O,$$

т.е. непосредственный окислитель – азотистая кислота. В связи с такими противоречивыми мнениями были проведены дополнительные исследования.

Результаты одновременного исследования кинетики растворения $UO_2$ и установления потенциала в системе $UO_2 – H_2SO_4 – HNO_3$ при 20 ºС приведены на рисунке 2. При введении в сернокислый раствор азотной кислоты и диоксида урана редокс-потенциал Е повышается постепенно и даже за 2 ч не достигает постоянной величины. Сопоставление кривых 1 и 1', 2 и 2', 3 и 3' показывает, что между кинетикой установления редокс-потенциала и растворением диоксида урана нет прямой зависимости. В то время как окисление и растворение $UO_2$ даже в растворе, содержащем 100 г/л $HNO_3$, достигает за 2 ч лишь нескольких процентов, Е за это время повышается почти до 800 мВ. Эти экспериментальные факты понятны, если азотная кислота в данных условиях не является непосредственным окислителем, а в процессе окисления принимают участие продукты ее разложения и именно они определяют потенциал Е системы.

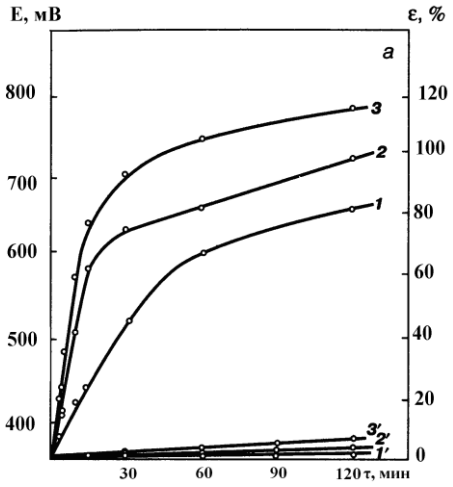



**Рис. 2.** Зависимости редокс-потенциала Е системы $H_2SO_4 – HNO_3 – UO_2$ (кривые 1 - 3) и степени растворения урана ε (кривые 1' - 3') от концентрации $HNO_3$ и продолжительности процесса t при 20: 1 и 1' – концентрация $HNO_3$ равна 20 г/л; 2 и 2' – 60 г/л; 3 и 3' – 100 г/л

Кей и Стерн [8] указывают, что ниже 70 ºС скорость разложения даже 100%-й азотной кислоты неизмеримо мала. Поэтому наблюдающееся растворение $UO_2$, вероятно, связано с ускорением разложения $HNO_3$ под каталитическим влиянием продуктов ее восстановления - оксидов азота.

При температуре 70 ºС в той же системе процессы окисления и растворения UO2, как ясно из рисунка 3, протекают значительно быстрее, чем при 20 ºС. Не менее существенно изменяется и кинетика установления редокс-потенциала, ε достигает предельного значения уже в

начале процесса.

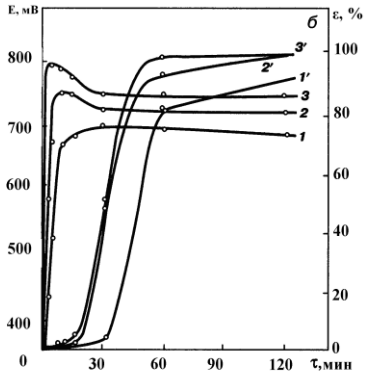



**Рис. 3.** Зависимости редокс-потенциала E системы $H_2SO_4$ – $HNO_3$ – $UO_2$ (кривые 1 - 3) и степени растворения урана ε (кривые 1' - 3') от концентрации $HNO_3$ и продолжительности процесса t при 70 ºС: 1 и 1' – 10 г/л; 2 и 2' – 25 г/л; 3 и 3' – 60 г/л; концентрация $H_2SO_4$ – 45 г/л

Ограничимся качественной характеристикой кинетики рассматриваемого процесса ввиду исключительной сложности исследуемой гетерогенной системы, содержащей твердое тело, раствор и газ, причем количество последнего зависит от целого ряда параметров. Вместе с тем из приведенных выше данных можно сделать существенные выводы о свойствах азотной кислоты при ее взаимодействии с диоксидом урана.

Исследование факторов, определяющих окислительную активность азотной кислоты при ее взаимодействии с диоксидом урана, показывает, что $HNO_3$ не является непосредственным окислителем. Все факторы, благоприятствующие повышению окислительной активности азотной кислоты, одновременно содействуют ускорению ее разложения. Поэтому представляется очевидным, что при взаимодействии $HNO_3$ с оксидами урана непосредственный окислитель – один из продуктов ее разложения или даже одновременно несколько образующихся при этом веществ, например, $HNO_2$ и $NO_2$.

## Заключение

Результаты исследования факторов, определяющих окислительную активность азотной кислоты и роль продуктов ее разложения при гетерогенном окислении урана, могут быть положены в основу разработки технологии пачукового выщелачивания урана при переработке отвалов уранодобывающих предприятий.

## Список литературы

1. *Филиппов А.П.* Исследование процессов окисления применительно к технологии переработки урановых и ураномолибденовых руд: дисс. ... д-ра техн. наук: 25.00.22: защищена 22.06.7978: утв. 12.02.1977 / Филиппов Анатолий Павлович. - Москва, 1979. - 160 с.
2. *Przewlocka H.* Zesz. nauk. Politeckn. Czestochowsk / H. Przewlocka. − Zeshia, 1969. − № 62. − С. 22 - 49.
3. *Мурашкина К.Н.* Результаты сравнительного изучения окислительной способности растворов $HNO_3$ и $NaNO_3$ / К.Н. Мурашкина, Г.Л. Цыганов // Узб. хим. журн. – Узбекистан: Узбекиздат, 1965. − № 3. − С. 20 - 31.
4. *Алексеева Н.И.* Электрохимия / Н.И. Алексеева [и др.]. – М.: Наука, 1971. − 873 с.
5. *Колтунов В.С.* Кинетика реакций актиноидов. Окисление и восстановление ионов урана и трансурановых элементов в растворах / В.С. Колтунов. – М.: Атомиздат, 1974. − 427 с.
6. *Vetter K.* Z. anorg. allg. Chem / K. Vetter // I. Chem. Soc. London. Bd. − 1949. − 260. − 242 p.
7. *Monk R.* Review of uranium ore proussing research / R. Monk, H. Ellingham // J. Brit. Nucl. Energy Soc. – 1969. − V. 8. – № 2. – 93 p.
8. *Kay W.* Nitric acid for oxidation of dioxide of uranium in sulfate solutions depending / W Kay, S. Stem // Ind. Eng. Chem. − 1955. − V. 47. − 1463 p.

## References

1. Filippov A.P. Investigation of oxidation processes in relation to the technology of processing uranium and uranium-molybdenum ores: diss. ... Doctor of Technical Sciences: 25.00.22: protected 22.06.7978: approved 12.02.1977 / Filippov Anatoly Pavlovich. - Moscow, 1979. - 160 p.
2. Przhevlotskaya H. Zests. nauk. Politecn. Czestochovsk / H. Przewlocka. - Zeshia, 1969. - No. 62. - p. 22-49.
3. To Murashkina.N. Results of a comparative study of the oxidative capacity of solutions of HNO3 and NaNO3 / K.N. Murashkina, G.L. Tsyganov // Uzbek Chemical journal - Uzbek-kistan: Uzbekizdat, 1965. - No. 3. - pp. 20 - 31.
4. Alekseeva N.I. Electrochemistry / N.I. Alekseeva [et al.]. - M.: Nauka, 1971− - 873 p.
5. Koltunov V.S. Kinetics of reactions of actinoids. Oxidation and reduction of uranium ions and transuranic elements in solutions / V.S. Koltunov. - M.: Atomizdat, 1974− - 427 p.
6. *Vetter K.* Z. anorg. allg. Chem / K. Vetter // I. Chem. Soc. London. Bd. − 1949. − 260. − 242 p.
7. *Monk R.* Review of uranium ore proussing research / R. Monk, H. Ellingham // J. Brit. Nucl. Energy Soc. – 1969. − V. 8. – № 2. – 93 p.
8. *Kay W.* Nitric acid for oxidation of dioxide of uranium in sulfate solutions depending / W Kay, S. Stem // Ind. Eng. Chem. − 1955. − V. 47. − 1463 p.

УДК 66.08:621.0

# К вопросу применения малых модульных реакторов

А.М. Акимов, С.А.Федорова, Е.А.Магдыч
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, РоссияAMAkimov@sevsu.ru, .s.a.fedorova@sevsu.ru,EAMacduch@sevsu.ru,*

Статья поступила 10.02.2022 г.; после доработки 14.02.2022 г.

***Аннотация***

*В статье проанализированы перспективы использования малых модульных реакторов. Рассмотрены типы малых реакторов, масштабы и различные применения ThirdWay модификации. Отмечены достоинства использования атомных станций малой мощности: серийность производства законченных блоков, маневренность, более низкая стоимость по сравнению с традиционными АС, возможность постепенного наращивания мощности. В качестве недостатка отмечена высокая стоимость киловатт-часа на сегодняшний день, выявлены причины.*

*Ключевые слова:* атомные станции малой мощности, малые модульные реакторы

# On the issue of using small modular reactors

Akimov A.M., S.A. Fedorova, Magdych E.A.
*Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia*
*[1]AMAkimov@sevsu.ru, s.a.fedorova@sevsu.ru,EAMacduch@sevsu.ru,*

Received 10.02.2022 y.; received in final form 10.02.2022 y.

***Abstract***

*The article analyzes the prospects for the use of small modular reactors. The types of small reactors, the scale and various applications of the ThirdWay modification are considered. The advantages of using nuclear power plants of low power are noted: serial production of completed units, maneuverability, lower cost in comparison with traditional nuclear power plants, the possibility of a gradual increase in power. As a disadvantage, the high cost of a kilowatt-hour is noted today, and the reasons are identified.*

*Key words:* nuclear power plants of low power, small modular reactors

## Введение

Расхожее мнение относительно того, что передовые технологии носят концептуальный характер и перспективы их коммерческого использования достаточно далеки. Но, проведенный комплексный анализ глобальных усилий по разработке передовых ядерных технологий показывает быстрый прогресс в их коммерциализации и эксплуатации, считают американские прогрессивные экологические организации Clean-AirTaskForce, ClearPath, NuclearInnovation-Alliance, Pillsbury и ThirdWay[1].

Растущий интерес к модульным реакторам (реакторам малой и средней мощности) обусловлен, в том числе, их возможностью гибкого производства электроэнергии и замены электростанций, работающих на органическом топливе. Внутренне присущие и пассивные средства безопасности способствуют снижению капитальных затрат. Перспективны для использования в отдаленных регионов. Кроме того, могут быть использованы в составе одномодульных или многомодульных станций. На сегодняшний день в мире насчитывается примерно 50 проектов и концепций ММР, из которых 4 на этапе строительства в Аргентине, Китае и России [2]. Координацией разработок различных типов ММР осуществляет непосредственно МАГАТЭ.

**Целью исследования** является анализ использования малых модульных реакторов в энергетике.

### Задачи исследования

1. Анализ перспектив использования малых модульных реакторов.
2. Использование малых модульных реакторов в энергетике и теплоснабжении.

### Перспективность использования малых модульных реакторов

Демонстрации различных типов конструкций модульных реакторов показывают их перспективность для решения климатических проблем. Насчитывается порядка 30 конструкций, опытные демонстрации которых, позволяют рассматривать их в коммерческом использовании. Проекты отличаются по целевому назначению, размерам, особенностям реализации технологических процессов. Снижение рисков строительства и монтажа таких реакторов достигается за счет высокого уровня промышленного изготовления, упрощения конструкции модульности. При этом, широкое внедрение позволит снизить их стоимость. На рисунке 1 приведены типы малых ректоров, масштабы и различные применения ThirdWay модификации.

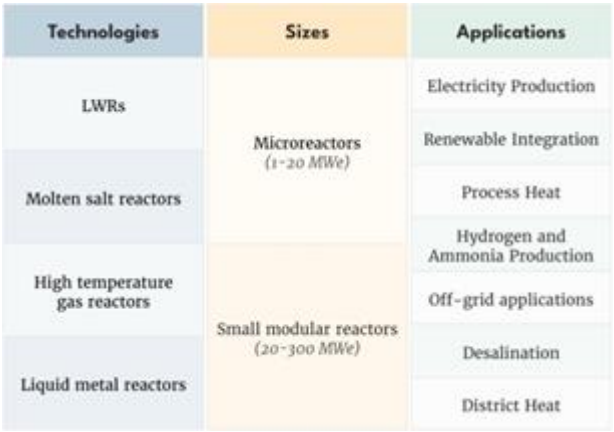



**Рис.1.** Типы малых реакторов, масштабы и различные применения ThirdWay модификации [1]

### Использование малых модульных реакторов в энергетике, опреснении и теплоснабжении

Актуален вопрос использования АСММ для решения проблем опреснения воды. Находясь в окружении морей и океанов, человечество испытывает проблемы водоснабжения как для бытовых, так и для промышленных целей.

В мае 2020 года Министерство энергетики США запустило программу демонстрации передовых реакторов, в рамках которой, по состоянию на 2021 финансовый год, было выделено 480 миллионов долларов США в виде ассигнований на эти проекты.

В декабре 2020 года правительство Канады совместно с ключевыми заинтересованными сторонами по всей стране запустило Канадский план действий по малым модульным реакторам (SMR). Этот план был реализован в рамках «дорожной карты» по SMR от 2018 года, которая была разработана под руководством Министерства природных ресурсов Канады. План был подготовлен в результате совместной работы канадских провинций, коренных народов и общин, коммунальных предприятий, поставщиков технологий и национальных лабораторий.

Премьер-министр Великобритании по «зеленой промышленной революции» включил атомную энергетику в свой десятипунктный план, который был опубликован в ноябре 2020 года. В SMR в рамках программы сокращения стоимости строительства атомных объектов “LowCostNuclear”, начиная с 2021 года правительство Великобритании инвестирует 215 млн фунтов стерлингов (~300 млн долларов США) [1,2].

В декабре 2019 года была подключена к сети первая в мировой практике плавучая коммерческая малая АЭС - российская ПАТЭС "Академик Ломоносов". На нем установлены два реактора КЛТ-40С мощностью по 35 МВтэ, аналогичный реакторам, которые используются на атомных ледоколах. Это позволяет обеспечить электричеством удаленную сеть Чаун-Билибино на Дальнем Востоке России.

Проект HTR-PM – двух высокотемпературных реакторов с шаровыми твэлами мощностью 100 МВт, которые реализуются на атомной электростанции "ШидаоБэй", показывают передовые технологии Китая.

Исследовательские реакторы проекта SMR Аргентины используются вАвстралии, Перу, Алжире и Египете. На АЭС «Атуча» планируется к введению в эксплуатацию в 2024 году малый реактор ВВЭР - CAREM-25.

В 2019 году компания HoltecInternational и национальный ядерный оператор Украины, НАЭК "Энергоатом", Государственный научно-технический центр Украины заключили консорциумное партнерство для развертывания в Укра-

ине реактора SMR-160 компании Holtec и создания в стране производственного центра для его модулей. На Ровенской АЭС к 2030 году планируется ввести 6 блоков. Для дополнения проектов по альтернативной "Энергоатомом" рассматриваютсяварианты развертывания дополнительных блоков SMR-160.

Национальные проекты по атомной энергии 2017 года Саудовской Аравии включают использование малых модульных реакторов для решения задач опреснения и теплоснабжения. Корейскому легководяному реактору интегрального типаSMART мощностью 100 МВт и китайскому HTGR отдают предпочтение в городе имени короля Абдаллы в Саудовской Аравии - это город атомной и возобновляемой энергии. [1,2].

Большинство стран рассматривает новые малые АЭС как вариацию обеспечения энергией. Страны - конечные пользователи, заинтересованы в современных технологиях, направленных на решение конкретных задач, связанных с электропотреблением. Страны - поставщики получат значительное преимущество на рынке услуг, при предоставлении конкурентоспособного продукта. На сегодняшнем рынке уже фигурирует более ста проектов АСММ различного уровня. Порядка 10 проектов уже имеют продвинутую стадию разработки и готовы получить лицензии (свидетельства о безопасности конструкции) от национальных атомных регуляторов. Так, американский стартапNuScaleначал процедуру получения лицензии у регулятора NRC в феврале 2018 года [3].

Усилия, направленные на развитие технологий в производстве реакторов малой мощности, требует усиление финансовой и политической поддержки.

На фоне неоднозначного отношения к традиционной атомной энергетике, развитие реакторов малой мощности спонсируется государством в таких странах как США, Великобритания и Канада. Обсуждение первых АЭС с АСММ ведется в ключе «новой низкоуглеродной энергетики». [3].

К несомненным плюсам малых АС перед традиционными можно отнести:

- производство на машиностроительных заводах крупными сериями в виде законченных блоков. Это сокращает сроки и снижает сложность строительства атомных станций;
- маневренность. Использование ветровой и солнечной энергетики требует подхватывающей энергетики – при безветренной погоде или в темное время суток;
- энергосистемы относительно небольшой мощности, где использование гиговаттных блоков нерентабельно;
- атомные станции с использованием малых модульных реакторов стоят дешевле, наращивать мощности, при необходимости, можно постепенно. Это упрощает финансирование энергопроектов [3].

Минусы сводятся к стоимости киловатт-часа, вырабатываемого на АСММ. Так, в проекте строительства реакторного модуля Toshiba 4S (10 МВт) в городке Галена (штат Аляска) стоимость электроэнергии получалась на уровне 56 центов за кВт·ч (~36 рублей за кВт·ч). Проект плавучей малой АЭС (ПАТЭС) «Академик Ломоносов» вбездотационном варианте - порядка 60 рублей за кВт·ч. Такие цены неконкурентоспособныс дизель-генерацией или угольной ТЭС [3].

Один из важных элементов высокой цены — отношение атомных регуляторов к малым станциям, как к большим. Это – охрана, обращение с отработанным ядерным топливом малых станций. Проекты АСММ отходят от традиционных эшелонированных систем расхолаживания реактора в случае аварии всилу самой физики малых реакторов. Она позволяет бороться с потенциальными аварийными ситуациями естественным путем, без привлечения активных систем. Так, реакторы NuScale могут охлаждаться до безопасного состояния без каких-либо действий операторов - только за счет запаса выкипающей воды вокруг реактора и на завершающем этапе — за счет конвекции атмосферного воздуха. Небольшие размеры АСММ позволяют закапывать их в землю, упрощая конструкции барьеров нераспространения.

Среди АСММ есть быстрые натриевые реакторы (проект Toshiba 4S и General ElectriPRISM), реакторы с расплавом урановой(американско-канадскийпроект IMSRот Terrestrial Energy) или ториевой соли (LTFR от Flibe Energy) в качестве топлива или отечественные свинцово-висмутовые и свинцовые проектыСВБР-100 и БРЕСТ-300-ОД. Есть и совсем концептуально революционные, вроде «реактора-свечи» от стартапаTerraPower, финансировавшегося Биллом Гейтсом [3].

Однако преобладают традиционные водные решения, разработчики которых планируют достигнуть конкурентной стоимости проектов за счет серии и упрощения конструкции. Это проекты - Westinghouse SMR, корейский KAERI SMART, китайский ACP100, отечественный КЛТ-40Си РИТМ-200 или французский подводный Flexblue.

Корпорация «Росатом» ведет разработку передовых вариантов малых реакторов: проекты «Шельф», «Витязь», АТГОР, СВБР-100, АБВ-6, сооружаемый в рамках проекта «Прорыв» БРЕСТ-300. Пока, кроме БРЕСТа, проекты находятся в стадиях технического предложения, без финансирования и привязки к конкретному строительству. Но, при изменении конъюнктуры могут быть доведены до реальной АЭС за 5–10 лет.

Возросший спрос на АСММ связан с тем, что рынок уже насыщен проектами АЭС с реакторами типа ВВЭР, PWR, BWR. Некоторые фирмы оказались на грани банкротства (AREVA) или банкротами (Westinghouse). На месте сегодняшних АЭС не будет «зелёных лужаек». [4].

## Выводы

Так, в районах, где отсутствуют достаточные линии передачи и пропускная способность сети, АЭММ могут быть установлены в существующую сеть или удаленно отключены от сети в зависимости от ее меньшей электрической мощности, обеспечивая низкоуглеродистую электроэнергию для промышленности и населения. Это актуально для реакторов, которые предназначенных для выработки электроэнергии мощностью до 10МВт(е). Такие реакторы могут быть использованы в качестве резервных источников питания в чрезвычайных ситуациях или заменять генераторы энергии, работающие на дизельном топливе, например, в сельской местности или на удаленных предприятиях.

По сравнению с существующими реакторами предлагаемые конструкции АСММ, как правило, проще, а концепция безопасности для АСММ в большей степени зависит от пассивных систем и присущих реактору характеристик безопасности, таких как низкая мощность и рабочее давление. Это означает, что в таких случаях для отключения систем не требуется никакого вмешательства человека или внешней энергии или силы, поскольку пассивные системы зависят от физических явлений, таких как естественная циркуляция, конвекция, гравитация и самонапряжение. Эти повышенные пределы безопасности в некоторых случаях устраняют или значительно снижают вероятность небезопасных выбросов радиоактивности в окружающую среду и население в случае аварии.

АСММ снизили потребности в топливе. Электростанции, основанные на SMR, могут требовать менее частой заправки каждые 3-7 лет по сравнению с 1-2 годами для обычных установок. Некоторые SMR рассчитаны на эксплуатацию до 30 лет без дозаправки [5].

## Список литературы


1. Разработка и внедрение усовершенствованных малых реакторов быстро прогрессируют в мире / Атомная энергия 2 https://clck.ru/ZaQeb(Дата обращения 15.10.2021г)
2. IAEA Международное агентство по атомной энергетике. Малые модульные реакторы https://clck.ru/ZaQfU(дата обращения 15.10.21)
3. Битва ядерных компактов: рыночные перспективы малых АЭС | Статьи | Известия https://clck.ru/ZaQgP(дата обращения 24.12.21)
4. Виноградов А.А. Реакторные установки для АС малой мощности. Концепция АСММ в 21-ом веке https://clck.ru/ZaQhC(дата обращения 24.12.21)
5. Что такое Малые модульные реакторы (SMR)? | МАГАТЭ https://clck.ru/ZaQhx(дата обращения 24.12.21)


## References


1. Razrabotka i vnedrenie usovershenstvovannyh malyh reaktorov bystro progressiruyut v mire / Atomnaya energiya 2 https://clck.ru/ZaQeb (Data obrashcheniya 15.10.2021g)
2. IAEA Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoj energetike. Malye modul'nye reaktory https://clck.ru/ZaQfU (data obrashcheniya 15.10.21)
3. Bitva yadernyh kompaktov: rynochnye perspektivy malyh AES | Stat'i | Izvestiya https://clck.ru/ZaQgP (data obrashcheniya 24.12.21)
4. Vinogradov A.A. Reaktornye ustanovki dlya AS maloj moshchnosti. Koncepciya ASMM v 21-om veke https://clck.ru/ZaQhC (data obrashcheniya 24.12.21)
5. CHto takoe Malye modul'nye reaktory (SMR)? | MAGATE https://clck.ru/ZaQhx (data obrashcheniya 24.12.21)

УДК 666.9.017:539.12.043

# Исследование влияния нейтронного облучения на физико-механические свойства материалов

Корнеева Н.К.[1], Пичугова Л.Н.[2], Глушкова Е.В. [3], Дюдяев И.А. [4], Майорова В.В. [5]

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,г. Севастополь, 299053, Россия , korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, glusev@mail.ru, ntv5.5@mail.ru, vmaiorova0801@outlook.com.*

Статья поступила 09.02.2022 г.; после доработки 11.02.2022 г.

***Аннотация***

*В работе приведены некоторые сведения по трению и износу в условиях воздействия радиации. Изложено влияние облучения на характеристики чистых и неоднородных металлов, а также влияние различных по плотности и энергии потоков электронов на изменение физико-механических свойств материалов. Описаны примеры износа облученных и необлученных образцов и изменение коэффициента трения по времени работы. Следует отметить, что в работе излагается влияние на коэффициент трения облучения различных покрытий и некоторых твердых смазочных материалов. Приведены данные о влиянии облучения на различные полимеры и изменении их свойств. Даются некоторые рекомендации по выбору материалов для работы в условиях облучения.*

*Ключевые слова:* коэффициент трения, износ, сухое трение, трение скольжения, воздействие радиации, облучение твердых смазочных материалов, облучение металлов с различными покрытиями, облучение полимеров.

# Study of the effect of neutron irradiation on the physical and mechanical properties of materials

Korneeva, N.K.[1], Pichugova, L.N.[2], Glushkova E.V. [3], Dyudyaev I.A. [4], Mayorova V.V. [5]

*Sevastopol State University, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia, korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru, glusev@mail.ru, ntv5.5@mail.ru, vmaiorova0801@outlook.com.*

Received 09.02.2022 y.; received in final form 11.02.2022 y.

***Abstract***

*The paper gives some information on friction and wear under the influence of radiation. The influence of irradiation on the characteristics of pure and inhomogeneous metals and the effect of different density and energy of electron fluxes on the change in the physical and mechanical properties of materials is described. Examples of wear of irradiated and non-irradiated samples and changes in friction coefficient with operating time are described. It should be noted that the paper outlines the effect on the friction coefficient of various coatings and some solid lubricants. Data on the effect of irradiation on various polymers and changes in their properties are given. Some recommendations on the choice of materials for work under irradiation conditions are given.*

*Keywords:* coefficient of friction, wear, dry friction, sliding friction, radiation exposure, irradiation of solid lubricants, irradiation of metals with various coatings, irradiation of polymers.

## Введение

Взаимодействие высокоэнергетических электронов с металлами характеризуется проникновением электронов в металл на некоторую

глубину, рассеянием энергии электронного потока, проявлением интенсивного теплового и рентгеновского излучений, возникновением вторичной электронной эмиссии, механическим давлением электронного потока, созданием в объеме радиационных дефектов и т.д.

Глубина проникновения электронов в металл определяется их энергией и физическими свойствами металла (табл. 1).

***Таблица 1*** *Глубина проникновения электронов в металл*

| Энергия электронов $E \cdot 10^{13}$, Дж | Максимальный пробег электронов, мм | | |
|---|---|---|---|
| | Алюминий | Железо | Медь |
| 0,16 | 0,05 | 0,02 | 0,02 |
| 1,6 | 1,52 | 0,52 | 0,49 |
| 3,2 | 3,51 | 1,24 | 1,13 |
| 4,8 | 5,50 | 1,89 | 1,77 |
| 8,0 | 9,40 | 3,24 | 3,04 |
| 16,0 | 19,20 | 6,65 | 6,20 |

Если толщина металла превышает максимальную величину пробега электронов в этом материале, то происходит почти полное поглощение кинетической энергии электронов. При использовании мощных электронных потоков имеет место интенсивный местный разогрев поверхностных слоев металла. Когда энергия, переданная электронами атому металла, равна или превышает его "пороговую энергию", этот атом может перейти в междоузлие с образованием точечного дефекта. С повышением температур дефекты могут перемещаться, взаимодействуя между собой и с другими несовершенствами кристаллической решетки. Повышение температуры облучаемого металла сопровождается инициированием вторичных эффектов: ассоциацией вакансий и междоузельных атомов; ростом дискообразных скоплений, которые могут превращаться в дислокационные петли; образованием атмосфер Коттрелла. Все вместе взятое это отражается на физико-механических свойствах материала.

## Облучение чистых металлов

Во время облучения чистых металлов наблюдается обычно существенное повышение предела текучести, в меньшей степени – предела прочности и понижение таких характеристик, как ударная вязкость и относительное удлинение до разрушения. Чем не равномернее исходное состояние материала, тем больше отклонения от начальных параметров можно наблюдать в результате облучения. С увеличением плотности потока электронов и их энергии, т.е. при наличии терморадиационных эффектов, изменения физико-механических свойств материалов становятся еще более значительными. При плотности потока электронов $10^{18}$-$10^{19}$ электрон/(см$^2$ с) с энергией (11,2-12,2)$10^{-13}$ Дж наблюдается рост зерна в приповерхностном слое.

Например: облучение отожженной стали 45 привело к растворению перлита и образованию мартенситной структуры при средней температуре образца, не превышающей 300 ℃.

Облучение интенсифицирует различные физико-химические поверхностные процессы: химическую, адсорбционную, каталитическую активность поверхностных слоев. Испытания, проведенные в режиме сухого трения на образцах из армко-железа и стали 45 в паре с контртелом из стали 20Х13 показали, что износ облученных электронами образцов в сравнении с необлучёнными образцами снижается (в 1,1-1,5 раз) за счет образования закалочных структур. Коэффициент трения образцов в начальный момент испытаний был почти в 2 раза ниже по сравнению с необлученными образцами. В дальнейшем, по мере изнашивания материалов, коэффициент трения в обоих случаях был практически одинаков.

## Облучение металлов с различными покрытиями

При наличии различных покрытий импульсный поток электронов с энергией более 1,6*10$^{-13}$ Дж вызывает прогрев приповерхностных слоев материалов и ускоряет диффузионные процессы на границе разнородных сред. Облучение покрытий вызывает снижение коэффициента трения и стабилизацию его значений во времени (рис.1).

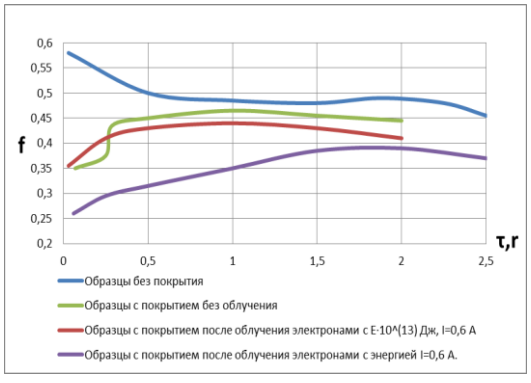



**Рис. 1.** Зависимость коэффициента трения цементированных образцов из АРМО-железа от времени испытаний.

Покрытие хрома толщиной 50-100 мкм на стали У8 облучали электронами с энергией 0,48*10 $^{-13}$ Дж интегральной дозой потока электронов F = $10^{18}$ электрон/см$^2$. Твердость хромового покрытия с добавкой $TiB_2$, составила 834-883.

Фрикционные испытания материалов показали улучшение трибологических характеристик покрытий толщиной до 50 мкм, что для указанных выше режимов облучения приблизительно соответствует пробегу электронов в хроме. Коэффициент трения модифицированных покрытий оставался прежним, а износостойкость повысилась в 4-6 раз.

## Облучение твердых смазочных материалов

Ряд твердых смазочных материалов обладают высокой радиационной стойкостью. Например, облучение композиционных спрессованных материалов на основе $WSe_2$, $MoSe_2$, и бронзы интегральной дозой потока $10^{13}$ нейтрон/см$^2$ при температуре 55-88 °С в течение 79 ч вызвало лишь незначительное изменение их размеров и твердости.

Воздействие облучения электронами энергией 3,2x10$^{-16}$ Дж, плотностью тока 400 мкА/см$^2$ и мощностью дозы ($10^5$-$10^6$) Вт/кг в вакууме 1,33*10$^{-5}$Па на полимерные материалы фторопласт-4, стирол приводило к увеличению коэффициента трения с 0,2 до 0,4.

В определенных условиях облучение некоторых твердых смазочных материалов может привести к значительному уменьшению сил трения [2].

Для дисульфида молибдена, синтезированного на молибденовой подложке в виде слоя толщиной 50 мкм, коэффициент трения скольжения снизился с 0,04 до 0,0015. При облучении $MoS_2$ коэффициент трения снизился с 0,12 до 0,10.

Эффект аномально низкого трения на пленке $MoS_2$ определяется следующими факторами. При бомбардировке ускоренными атомами гелия поверхность дисульфида молибдена интенсивно очищается от влаги и становится структурно более упорядоченной благодаря лучшей ориентации поверхностей кристаллитов $MoS_2$ в зоне фрикционного контакта.

## Облучение полимеров

Значительно влияние облучения на полимеры. Под действием ионизирующих излучений в них образуются различного рода активные промежуточные частицы - свободные радикалы, молекулярные и осколочные ионы, возбужденные молекулы и т.д., которые вызывают дальнейшие химические превращения. Так, исследование влияния дозы у- облучения на прочностные и триботехнические характеристики ряда полимерных материалов показало, что увеличение дозы облучения до $10^6$ Дж/кг вызвало незначительное увеличение предела текучести, твердости и существенное снижение относительного удлинения при разрыве полимера, особенно в области повышенных температур. Ионизирующее облучение влияло на реологические свойства полимера - уменьшалось внутреннее трение и тем самым повышалась долговечность при циклических нагрузках.

Для обладающего сравнительно низкой прочностью полиэтилена - необлученного и облученного дозами до 4*$10^5$ Дж/кг - сегментальная подвижность граничных слоев незначительно ниже ее значений в объеме полимера. Это обусловлено относительно высокой интенсивности изнашивания, при которой граничные слои разрушаются и выносятся из зоны трения раньше, чем произойдет их упорядочивание. При последующем облучении до доз около $10^6$ Дж/кг прочность материала увеличивается, стойкость граничных слоев к изнашиванию возрастает, в результате чего степень их упорядоченности по сравнению с глубинными слоями полимера еще больше уменьшается (рис.2).

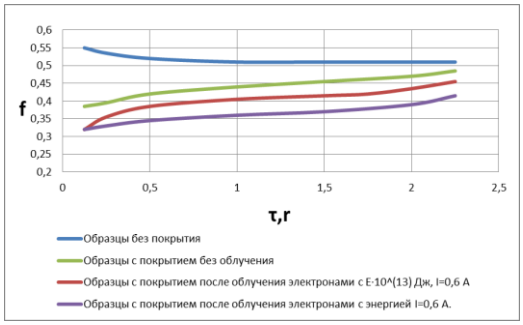



**Рис. 2** Зависимость коэффициента трения сульфидированных образцов из АРМО-железа от времени испытаний.

## Результаты испытаний

Облучение материалов нейтронами вызывает наибольшее в сравнении с другими ядерными частицами радиационные повреждения. Возникающие при этом дефекты заметно влияют на предел текучести, твердое относительное

удлинение и т.д. (рис.3 и 4).

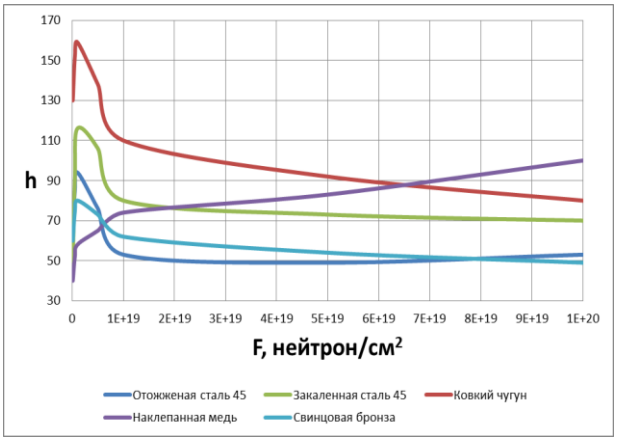



**Рис.3.** Зависимость износа образцов от флюенса нейтронов.

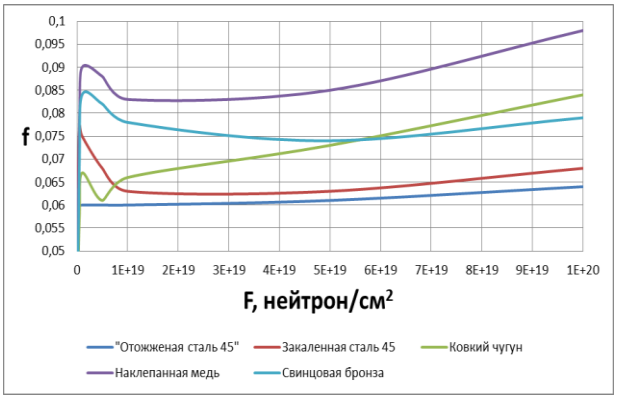



**Рис.4.** Зависимость коэффициента трения образцов от флюенса нейтронов.

Радиационное упрочнение арико-железа, меди и алюминия более значительно по сравнению с упрочнением сплавов на их основе, что позволяет сделать вывод о стабилизирующей роли атомов примесей при облучении материалов. У облученных железоуглеродистых сплавов коэффициент трения изменяется слабо, у медных сплавов - существенней. Данное явление объясняется как изменением механических свойств, так и более высокой окисляемостью облученных медных сплавов. Дефекты, возникающие под действием нейтронов в кристаллической решетке материала, а также ионизация среды вокруг образца при испытаниях способствуют интенсивному проникновению атомов кислорода в глубь металла и образованию плотной пленки окислов.

В процессе трения облученной меди по стали на поверхности стального контртела видны борозды, оставляемые абразивными частицами твердого окисла.

## Вывод по результатам испытаний

При выборе материалов для работ в условиях нейтронного облучения следует отдать предпочтение парам из нормализованных видов стали или чугуна в литом и отожженном состояниях и медным сплавам малой окисляемостью.

При облучении материалов нейтронами протекает одновременно два процесса: упрочнение вследствие образования дефектов, затрудняющих движение дислокаций при деформации металла, и разупрочнение, вызванное изменением свойств границ кристаллов. При облучении нейтронами разупрочнение может преобладать при незначительной выдержке в реакторе, когда число дефектов решетки от действия быстрых нейтронов еще относительно мало. С увеличением выдержки под облучением число радиационных дефектов в материале растет, что приводит к преобладанию процесса упрочнения.

## Заключение

1. Общая закономерность для испытанных материалов: повышение износостойкости облученных материалов в сравнении с необлученными при одновременном увеличении коэффициента трения скольжения.

2. Применение различных покрытий способствует улучшению противоизносных свойств сталей.

## Список литературы

1. Ю.Н. Дроздов, В.Г. Павлов, В.Н .Пучков. Трение и износ в экстремальных условиях. М.; "Машиностроение", 1986.
2. Сорокин А. А., Марголин Б. З., Курсевич И. П., Минкин А. И., Неустроев В. С., Белозеров С. В. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР // Вопросы материаловедения. – 2011. – № 2(66) – С. 131-152.
3. Е.А. Марковский, М.М. Краснощеков, Д.Д. Переверзев. Антифрикционные свойства облученных сплавов. М., Атомиздат, 1978, с.65.

## References

1. Blechman I. I., Dzhanelidze G. I. Vibrational displacement. Moscow: Nauka, 1964. 313 p.
2. Volosov V. M., Morgunov B. I. Averaging method in the theory of nonlinear oscillatory systems. Moscow: MSU Publishing House, 1971. 507 p.
3. Kragelsky I. V., Dobychin M. N., Kombalov V. S. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 526 p

УДК 004.453

# Дифференциальные уравнения к решению прикладных задач в среде matlab

С.А.Чернявская, О.В.Матузаева, В.Г.Царев
*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия., e-mail: svalch74@mail.ru, olga·matuzaeva@mail.ru,* tsarevvalentin1984@yandex.ru

Статья поступила 07.02.2022 г.; после доработки 09.02.2022 г.

***Аннотация***

*В работе рассмотрены некоторые прикладные задачи, решенные с помощью дифференциальных уравнений. Описаны методы и решения следующих задач: мощность вентилятора для очистки помещения от углекислоты; о распаде радия ;об определении магнитного потока катушки; о скорости химической реакции. К некоторым задачам применен математический пакет для инженерных и научных расчетов – Matlab.*

*Ключевые слова:* дифференциальные уравнения, частное решение, среда Matlab.

# Differential equations for solving applied problems in matlab

S.A. Chernyavskaya, O.V. Matuzaeva, V.G. Tsarv
*Sevastopol state University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: svalch74@mail.ru, olga·matuzaeva@mail.ru,* tsarevvalentin1984@yandex.ru

Received 07.02.2022 y.; received in final form 09.02.2022 y.

***Annotation***

*The paper considers some applied problems solved with the help of differential equations. Methods and solutions of the following tasks are described: fan power for cleaning the room from carbon dioxide; on the decay of radium; on the determination of the magnetic flux of the coil; on the rate of chemical reaction. A mathematical package for engineering and scientific calculations – Matlab - has been applied to some tasks.*

*Keywords:* differential equations, partial solution, Matlab environment.

## Введение

Решение многих задач техники и естествознания приводят к уравнениям, в которые входят неизвестная функция $y = f(x)$, ее аргумент $x$ и производные $y', y'', \ldots y^{(n)}$.

Такая зависимость, устанавливающая связь между этими величинами называют дифференциальным уравнением.

Рассмотрим некоторые задачи, решения которых приводят к дифференциальным уравнениям.

## Задача №1

В замкнутом помещении вместимостью $V = 2500$ м$^3$ воздуха содержится $p = 0{,}8\%$ углекислоты. Вентиляторы доставляют воздух, содержащий $q = 0{,}02\%$ углекислоты. Рассчитать мощность вентиляторов, чтобы по истечении 10

минут углекислота не превышала 0,2%.

**Решение**

Пусть мощность вентилятора $a$ м$^3$ в минуту. Обозначим содержание кислоты в некоторый момент $t$ через $x\%$. Найдем количество углекислоты, выкачиваемое вентиляторами, за время $dt$. За это время количество углекислоты уменьшится на $dx\%$, поэтому общее количество углекислоты, вышедшее из рассматриваемого помещения составит $\frac{V \cdot dx}{100}$ м$^3$

С другой стороны за $dt$ минут вентиляторы выкачают $\frac{a \cdot x}{100} dt$ м$^3$, а войдет $\frac{aq}{100} dt$ м$^3$, поэтому за время $dt$ будет выкачано $\frac{a}{100}(x-q)dt$ м$^3$

Учитывая, что $dx < 0$ и приравнивая полученные значения, будем иметь

$$\frac{a}{100}(x-q)dt = -\frac{Vdx}{100}$$

$$\Rightarrow \quad a(x-q)\,dt = -Vdx$$

Полученное уравнение является дифференциальным уравнением.

Решим его

$$-\frac{b}{a}dt = \frac{dx}{x-q}, \Rightarrow -\frac{b}{a}t = \ln|x-q| - \ln c, \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{c}(x-q) = e^{-\frac{b}{a}t}, \Rightarrow x-q = ce^{-\frac{b}{a}t}$$

Т.к. при $t=0, \quad x=0,8$, то имеем

$$x-0,02 = ce^{-\frac{b}{2500}t}, \Rightarrow 0,8-0,02 = ce^0, \Rightarrow c = 0,78.$$

Получаем частное решение

$$x-0,02 = 0,78e^{-\frac{b}{2500}t}.$$

Теперь, для того, чтобы найти мощность вентиляторов, используем условие задачи, что при $t=10, \quad x=0,2\%$

$$0,2-0,02 = 0,78e^{-\frac{b}{2500}10}, \Rightarrow \frac{18}{78} = e^{-\frac{b}{250}}, \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -\frac{b}{250} = \ln\frac{18}{78} \Rightarrow b = -250\ln\frac{3}{13} =$$

$$= 250\ln\frac{13}{3} = 250\ln 4,3 = 250 \cdot 1,46$$

$$b = 250 \cdot 1,46 = 365 м^3.$$

Следовательно, мощность вентилятора $u = 365 м^3 / мин$.

Рассмотрим несколько прикладных задач, сводящихся к решению дифференциальных уравнений, используя для этого математический пакет для инженерных и научных расчетов – Matlab.

**Задача №2**

Скорость распада радия в каждый момент времени пропорциональна наличной его массе. Определить, какой процент массы $m_0$ радия распадется через 200 лет, если известно, что период полураспада радия (период времени, по истечении которого распадается половина наличной массы радия) равен 1590 лет.

**Решение**

Общеизвестно, что скорость распада у радия всегда измеряется его количеством, распавшимся в единицу времени. Следовательно, за малый промежуток времени $\Delta t$, прошедший с определенного момента времени $t$, общее количество распавшегося радия равно $km\Delta t$, где $m$ - количество радия в данный момент времени, $k$ - коэффициент пропорциональности. Это же количество , взятое с знаком «минус» (так как масса радия убывает), равно приращению массы за время $\Delta t$:

$$\Delta m = -km\Delta t \qquad (1)$$

Далее разделим обе части равенства (1) на $\Delta t$ и перейдем к рассмотрению предела отношения $\frac{\Delta m}{\Delta t}$ при $\Delta t \to 0$.

Тогда

$$\lim_{\Delta t \to 0}\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = -km \qquad (2)$$

Соответственно легко заметить, что равенство (2) представляет собой дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Выполнив их разделение, получим следующее:

$$\frac{dm}{m} = -kdt \qquad (3)$$

В среде Matlab общее и частное решение данного дифференциального уравнения примет следующий вид:

```
>> % общее решение ДУ
>> m=dsolve('Dm=-k*m','t')
m =
C5*exp(-k*t)
>> % частное решение ДУ с заданным начальным условием - m(0)=m0 (m0- есть масса
```

радия в начальный момент t=0)

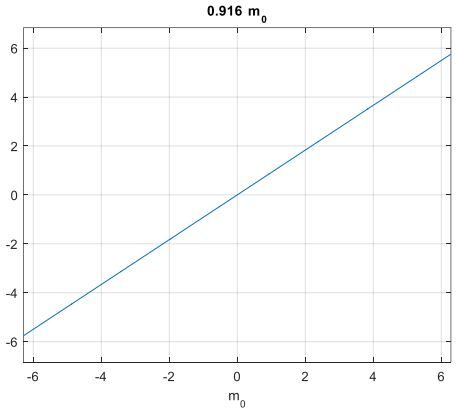
```
>> m=dsolve('Dm=-k*m','m(0)=m0','t')
m =
m0*exp(-k*t)
```

Коэффициент $k$ определим, исходя из дополнительного условия данной задачи. По условию известно, что период полураспада радия равен 1590 лет: при $t=1590$, $m=\frac{m_0}{2}$. Т.е.

$$\frac{m_0}{2}=m_0\cdot e^{-1590k}$$

Приведем синтаксис решения, оставшийся части данной задачи:

```
>> % определим значение k
>>      k=solve('m0/2=m0*exp(-1590*k)','k');
k=vpa(k,5)
k =
0.00043594
>> % Следовательно искомая функция -
m(t)=m0*exp(-0.00044*t)
>> % Найдем количество радия, оставшегося нераспавшимся через 200 лет
>> syms m0
>> k=0.00044;t=200;
>> m=m0*exp(-k*t);M200=vpa(m,3)
M200 =
0.916*m0
>> % отобразим графически результирующую функцию m(t)
>> ezplot(vpa(m,3));grid on;
>> % Следовательно, через 200 лет распадется лишь 8,6 % радия.
```




### Задача №3

Определить полный магнитный поток катушки, равномерно намотанной на сердечник прямоугольного сечения, внутренний радиус $R_1=4\,см$; наружный - $R_2=6\,см$; высота $h=2\,см$; $I=1a$; число витков $\omega=1000$; $\mu=80$ ( сердечник из магнитодиэлектрика). Величина потока удовлетворяет уравнению $\frac{d\Phi}{dR}=\frac{\mu I\omega h}{2\pi R}$.

### Решение

Выразим величину магнитного потока катушки из исходного дифференциального уравнения $\frac{d\Phi}{dR}=\frac{\mu I\omega h}{2\pi R}$

$$\Phi=\int d\Phi=\frac{\mu I\omega h}{2\pi}\int_{R_1}^{R_2}\frac{dR}{R}$$

Вычислим полученный интеграл, используя программную среду Matlab:

```
>> syms r
>> syms r a
>> h=2;I=1*a;mu=80;omega=1000;
>> % присвоим пределы интегрирования
>> R1=4;R2=6;
>> % внесем подынтегральную функцию
>> y=(mu*I*omega*h/(2*pi))*(1/r);
>> F=int(y,r,R1,R2)
F =
 (80000*a*log(3/2))/pi
```

### Задача №4

Количество вещества, входящего в химическую реакцию через $t$ секунд после её начала, равно $x$. Найти $x(t)$, если скорость реакции $\frac{dx}{dt}=-kx$, где $k$ - постоянная и $x|_{t=0}=a$.

Приведем синтаксис решения данной задачи в среде Matlab:

```
>> % общее решение ДУ
>> x=dsolve('Dx=-k*x','t')
x =
C7*exp(-k*t)
>> % частное решение ДУ с заданным начальным условием - x(0)=a
>> x=dsolve('Dx=-k*x','x(0)=a','t')
x =
a*exp(-k*t)
```

Т.о., мы видим, что количество вещества, входящего в химическую реакцию определяется уравнением $x=a\cdot e^{-kt}$ и геометрически представляет собой убывающую со временем экспоненциальную функцию.

## Список литературы

1. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления. – М.: Наука, 1972.-Т.П.
2. Егоров А.И. Обыкновенные дифференциальные уравнения с приложениями. 2-е изд., испр. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. - 384 с.
3. Потемкин В. Г. Вычисления в среде MATLAB: ДИАЛОГ- МИФИ. 2004.

## References

1. Piskunov N.S. Differential and integral calculus. - M.: Nauka, 1972.-T.P.
2. Egorov A.I. Ordinary differential equations with applications. 2nd ed., ispr. - M.: FIZMATLIT, 2005. - 384 p.
3. Potemkin V. G. Computing in MATLAB: DIALOG- MEPhI. 2004.

УДК 621.039.75:621.365.5

# Моделирование СВЧ плавления радиоактивного битумного компаунда

Д.В. Шевелев[1], С.С. Безотосный[1], В.Н. Григорьева[1], В.Ф. Тишков[1], И.И. Свириденко[2]

[1]*Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных электростанций, г. Москва, ул. Ферганская,, 25, корп. 1, v.tishkov@mail.ru*

[2]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, i.sviridenko@mail.ru*

Статья поступила 26.01.2022 г.; после доработки 28.01.2022 г.

***Аннотация***

*Представлена расчетная модель устройства для СВЧ нагрева радиоактивного битумного компаунда с целью его плавления и последующего извлечения из долговременного хранилища. Продемонстрированы основные этапы процесса расчетного моделирования СВЧ нагрева битумного компаунда. Рассмотрены основные особенности и физические механизмы такого нагрева. Показаны принципы моделирования устройств для СВЧ нагрева компаунда. Получены оптимальные геометрические размеры СВЧ излучателя, обеспечивающего формирование ванны расплава битумного компаунда с заданными характеристиками.*

*Ключевые слова:* радиоактивный битумный компаунд, СВЧ излучатель, волновод, диаграмма направленности, расчетное моделирование.

# The modeling of MW melting of radioactive bitumen compound

D.V. Shevelyov[1], S.S. Bezotosnyi[1], V.N. Grigoryeva[1], V.F. Tishkov[1], I.I. Sviridenko[2]

[1]*All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation, Ferganskaya st., 25, Moscow, Russian Federation, 109507, v.tishkov@mail.ru*

[2]*Sevastopol State University, 33, Universitetskaja st., Sevastopol, 299053, Russia, i.sviridenko@mail.ru*

Received 26.01.2022 y.; received in final form 28.01.2022 y.

***Abstract***

*The computational model presented of MW device for radioactive bitumen compound melting and consequent extraction from the long-term storage facility. The main stages shown of the computational modeling of MW heating process of bitumen compound. Examined the principal peculiarities and physical mechanisms of such heating. The principles demonstrated of the modeling process of devices for MW heating of the compounds. The optimal geometric dimensions obtained for MW emitter providing the molten-pool formation in bitumen compound with the given characteristics.*

*Keywords*: radioactive bitumen compound, MW emitter, waveguide, directional diagram, computational modeling.

## Введение

Битумирование радиоактивных отходов (РАО) применяется на АЭС России с начала 1960-х годов [1]. Использование битума для отверждения отходов объясняется тем, что битум термопластичен, позволяет успешно включать в него концентраты при нагревании с получением гомогенного продукта (компаунда), обладающего гидростойкостью [2].

Технология битумирования позволила связывать, длительно и безопасно хранить РАО низкого и среднего уровней активности в виде битумного компаунда (БК) на промплощадках АЭС

в специальных хранилищах в виде железобетонных закрытых отсеков наливного типа (Ленинградская АЭС), а также специальных металлических контейнерах (Калининская АЭС).

Однако в процессе длительного хранения происходит деградация БК с появлением неоднородностей, удержание радионуклидов в БК снижается. Вследствие радиационного воздействия и взаимодействия солей отходов с компонентами битумной матрицы, характеристики БК изменяются.

В связи с тем, что к битумным компаундам предъявляются требования по гомогенности, термической и радиационной устойчивости, влагостойкости, устойчивости к химическим, механическим и биологическим воздействиям, были проведены исследования некоторых отсеков хранилища. Результаты анализов проб битумного компаунда [3] показали, что наблюдается существенное изменение удельной радиоактивности по глубине залегания битумного компаунда, так как с увеличением сроков хранения происходит его расслоение. В точках слива в отсеки с отметок 2,0 – 3,0 м от дна отсека величина наполнения солями составляет 45 – 62 %, в то время как на поверхности она находится в пределах 16 – 22 %. Также наблюдается снижение концентрации нитратов в среднем в 5 – 14 раз и увеличение влагосодержания до 10,6 % [4].

По своим характеристикам битумный компаунд, согласно требованиям НП-019-15 [5] и НП-093-14 [6], не является продуктом, пригодным для захоронения. Поэтому для решения задачи приведения к заданным критериям в первую очередь, необходимо обеспечить безопасное извлечение БК из хранилищ.

Одним из перспективных методов извлечения радиоактивных битумных компаундов из хранилищ является применение технологии сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных излучений, обеспечивающих нагрев и плавление компаунда а, т.е. доведение его до состояния, при котором возможно его извлечение и перемещение в места, предназначенные для его кондиционирования с целью дальнейшего захоронения. Для реализации такой СВЧ технологии разрабатывается установка, позволяющая в автоматизированном режиме осуществлять разогрев, плавление и извлечение битумного компаунда из долговременного хранилища АЭС.

В связи с отсутствием опыта применения СВЧ технологий для переработки радиоактивных битумных компаундов, а также отработанных методик расчета СВЧ излучателей большой мощности, которые бы позволили производить нагрев и плавление битумной массы достаточно больших объемов за сравнительно короткие периоды времени, возникла задача определения параметров создаваемой установки. Поэтому на начальном этапе разработки технологической установки СВЧ плавления радиоактивного битумного компаунда был выполнен этап расчетного моделирования процесса СВЧ нагрева и плавления битумной массы, позволивший определить основные характеристики будущей промышленной установки.

Кроме того, проведены расчёты магнетронного тракта-сумматора СВЧ мощностей магнетронов и рупорного излучателя, обеспечивающего оптимальную диаграмму направленности СВЧ излучения и его равномерное распределение в объеме компаунда под рупором.

Цель статьи – описание расчетной модели установки СВЧ нагрева и плавления битумного компаунда, а также представление последовательности проведения расчетного моделирования нагрева битумной массы в имитаторе долговременного хранилища.

## Постановка задачи моделирования

Задачей моделирования является разработка конструкции СВЧ излучателя, сочетающего оптимальные характеристики поля СВЧ излучения с учетом условий технологичности изготовления излучателя.

Критериями оптимизации являются:

- диаграмма направленности излучателя, которая обеспечивает концентрацию и поглощение практически всего СВЧ излучения в пределах формирующейся ванны расплава и достижение максимальной глубины проникновения СВЧ энергии;
- наиболее равномерное распределение мощности в пределах диаграммы направленности.

Итоговый критерий оптимизации – достижение оптимальной формы ванны расплавленного битума под излучателем.

## Оптимизация конструкции излучателя с волноводными сборками

На основании результатов предварительно выполненных расчётов излучателя с использованием промышленных магнетронов единичной мощностью СВЧ излучения 10–25 кВт для создания установки с плотностью потока СВЧ излучения от 25 до 100 кВт/м$^2$ было принято решение использовать сборку из нескольких магнетронов,

размещенных на общем волноводе-сумматоре.

При этом предполагалось применить открытый резонатор-сумматор с отсутствующей нижней стенкой. Его геометрические характеристики должны были быть определены расчётным путём с целью достижения минимальных значений коэффициентов отражения и взаимного влияния магнетронов, а также максимальных значений направленности по вертикали и минимальной неравномерности СВЧ поля в горизонтальной плоскости. Для решения задачи была разработана расчётная модель, фрагмент которой показан на рис. 1, где под сборкой магнетронов и рупорным излучателем изображён фрагмент слоя битума, в пределах которого распространяется СВЧ излучение.

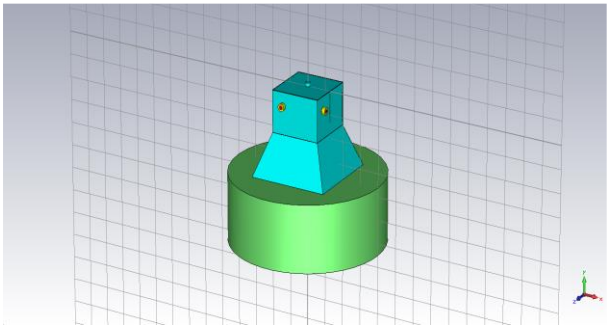


**Рис. 1.** Фрагмент расчётной модели СВЧ излучателя

Планировалась сборка из четырех промышленных магнетронов типа 2M290-04ASCJ с рабочей частотой 2,45 ГГц и единичной непрерывной выходной СВЧ мощностью до 3 кВт каждый. Такая сборка позволила бы регулировать суммарную мощность СВЧ излучения в пределах от 0 до 12 кВт. С учётом размеров модели битумохранилища размеры рупора в выходном сечении были заданы априори как граничное условие и составляли 0,6×0,6 м. При этом максимальный поток СВЧ излучения на поверхность битумного компаунда составил бы ~33 кВт/м2, что соответствует диапазону мощности в предварительно выполненных вариантных теплофизических расчётах.

Первоначально были проведены расчёты с волноводом-сумматором квадратного сечения с четырьмя магнетронами без рупорного излучателя (рис. 2). На рисунке изображены модель хранилища с битумным компаундом, боковые стенки сумматора и расположение магнетронов. Верхняя крышка условно не показана.

Предполагалось, что сумматор размещается над поверхностью битумного компаунда. Коэффициенты отражения СВЧ излучения по амплитуде напряжённости полей в этом случае находились в заданных пределах (менее 0,3). Однако, наблюдалась существенная расходимость излучения, особенно вблизи днища (рис. 3).

Выполненная расчетная оценка напряжённости электрического поля для различных глубин под поверхностью битума показала, что максимальная напряжённость поля в этом случае сосредоточена практически полностью под сумматором и за период СВЧ колебаний обегает всю площадь под ним.

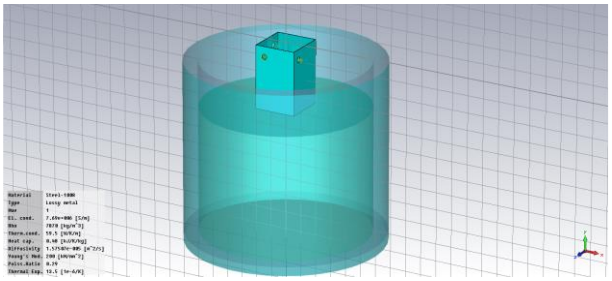


**Рис. 2.** Модель хранилища с битумом с волноводом-сумматором квадратного сечения

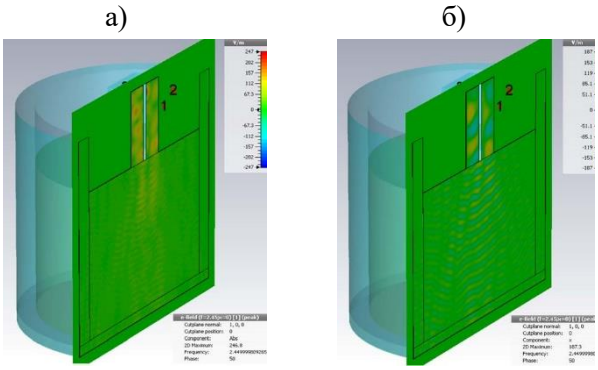
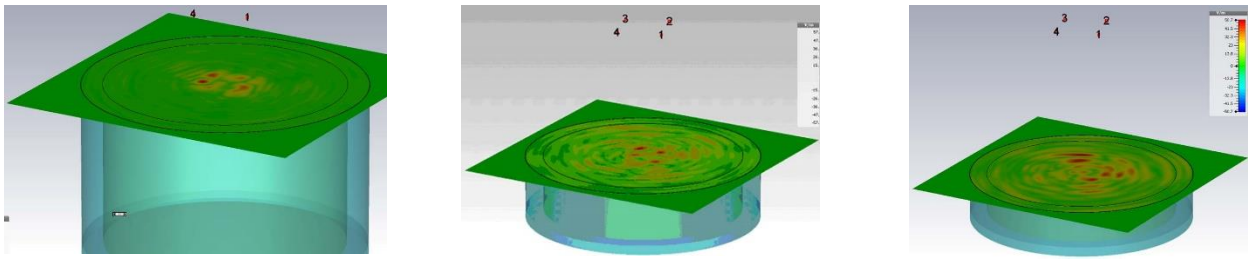



**Рис. 3.** Интенсивность (а) и амплитудные значения (б) СВЧ излучения

Это означает, что на незначительных глубинах под поверхностью (0,3 м) прогрев битумного компаунда равномерен и зона прогрева хорошо сконцентрирована (рис. 4 а). В то же время, на больших глубинах расходимость СВЧ излучения становится существенной (рис. 4 б, в). Начиная с глубин 0,4 – 0,5 м и ниже СВЧ-излучение распределяется уже практически по всему объёму модели хранилища, проникая также в бетонные стенки и нагревая их. Поэтому напряжённость поля падает и пропорционально квадрату напряжённости поля снижается эффективность нагрева битумного компаунда.

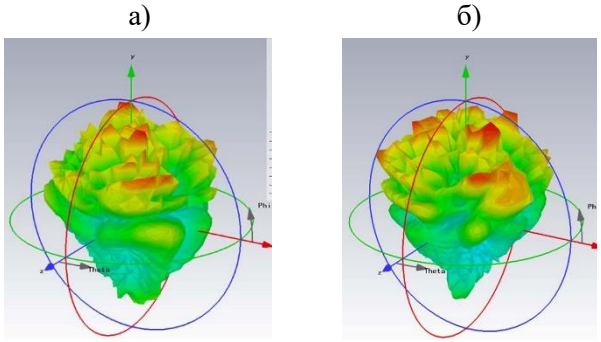


а) б) в)

**Рис. 4.** Распределение мгновенной абсолютной величины напряжённости поля на различной глубине битумного компаунда: а) – 0,3 м; б) – 0,4 м; в) – 0,5 м (цифрами обозначены номера магнетронов)

Таким образом, рассмотренная исходная конструкция обеспечивает разогрев лишь поверхностного слоя битума, до глубины не более 0,4 м. При этом доля поглощённой мощности не превышает 32,9 % от подводимой СВЧ мощности. Остальная мощность рассеивается за пределы рабочей зоны и безвозвратно теряется.

На рис. 5 представлены диаграммы направленности СВЧ-излучения при работе двух смежных магнетронов 1 и 4. В соответствии с принятой правосторонней системой координат, нумерация магнетронов выполнена против часовой стрелки, если смотреть сверху с положительного направления оси OY в начало координат. В силу симметрии системы, поля, создаваемые остальными двумя магнетронами, аналогичны показанным с точностью до поворота на угол 180° относительно оси OY.



а) б)

**Рис. 5.** Диаграммы направленности СВЧ излучения магнетронов № 1 (а) и № 2 (б)

На рисунке видно, что значительная доля СВЧ излучения, рассеявшись за пределы магнетронной сборки в стороны, отражается затем от стенок и днища хранилища и устремляется вверх, безвозвратно уходя из объёма битума. Общие потери мощности СВЧ излучения на утечку за пределы системы по отношению к поглощённой мощности, затраченной на нагрев битума в заданной области, составляют порядка 17 дБ, что является весьма существенной величиной.

По результатам расчетного моделирования было решено внести изменения в конструкцию СВЧ излучателя: сузить диаграмму направленности излучения в дальней зоне (снизить его расходимость) и одновременно улавливать максимально возможную часть отражённого вверх СВЧ излучения, направляя его обратно в битум. Иными словами, потребовалось снабдить волновод-сумматор снизу рупорным излучателем. Общее концептуальное техническое решение такого излучателя было представлено на рис. 1.

Для сокращения диапазона вариантных расчётов, предварительно были выполнены оценки геометрических параметров сборки волноводов или волновода-рупора в приближении геометрической оптики. Данное приближение является коротковолновым предельным случаем общего принципа Гюйгенса для суммирования волновых фронтов. Принцип Гюйгенса, в свою очередь, является одним из универсальных и фундаментальных принципов при анализе процессов распространения, преломления и отражения волн, независимо от соотношения длины волны и геометрических размеров системы.

Поскольку длина волны СВЧ излучения в вакууме при частоте 2,45 ГГц равна 12,24 см (в веществе – в $n$ раз меньше, где $n$ – показатель преломления, равный корню квадратному из вещественной части относительной диэлектрической проницаемости), она не может считаться малой по сравнению с размерам системы. Поэтому приближение геометрической оптики в данном случае не является вполне корректным и точным. Тем не менее, для предварительных и сугубо качественных, по порядку величин, оценок параметров системы, его использовать можно.

Исходя из предварительных результатов, в частности, диаграммы направленности, представленной на рис. 5, видно, что излучение, отражённое и рассеянное вверх за пределы системы, находится в пределах конуса с углом при вершине

~60º. Соответственно, чтобы направить это излучение обратно и сконцентрировать под поверхностью битума, наклон стенок рупорного излучателя будет находиться в пределах 10–35º. Отношение линейных размеров выходного среза рупора по отношению к характерным линейным размерам в горизонтальной плоскости общего волновода-сумматора или сборки индивидуальных волноводов должно быть определено таким образом, чтобы отразить и повторно перенаправить вниз не менее 95 % мощности излучения утечки. Это отношение можно оценить величиной ~3,5–5,0.

Поскольку размеры входного сечения рупора по порядку величины соизмеримы с размерами волноводов, в которые включены магнетроны, дополнительным условием является также требование, чтобы коэффициенты отражения СВЧ излучения обратно на магнетроны оставались минимальными и по амплитуде напряжённости поля не превышали 0,3. Это необходимо для соблюдения требуемых эксплуатационных характеристик магнетронов, при которых изготовитель гарантирует их безаварийную работу в пределах не менее гарантированной наработки на отказ, равной 1000 часов [7].

Поскольку изначально был использован общий волновод-сумматор, в поперечном сечении квадратной формы со стороной 0,25 м, то размеры рупора в нижней части с учётом предварительных оценок составили бы 0,85–1,25 м по каждой из сторон. Столь большие размеры оказались неприемлемы, поскольку рупор просто не поместился бы внутрь модели хранилища битума.

При исследовании формирования ванны расплава под рупором необходимо было выполнить оценку её геометрии для сохранения некоторой части битума холодным у стенок модели хранилища. Оптимальные размеры рупора на выходе не должны были превышать 0,6 м по каждой из сторон. Этот параметр был принят как дополнительное граничное условие для получения требуемой и достаточно высокой плотности потока СВЧ излучения, хотя бы в пределах 20–35 кВт/м$^2$.

Поскольку при площади сечения рупора на выходе в пределах 0,7–1,5 м$^2$ плотность потока СВЧ излучения, даже при работе четырех магнетронов по 3 кВт каждый и эффективной действительной излучающей способности сборки около 85 %, не превысила бы 7–15 кВт/м$^2$.

В соответствии с выполненными ранее теплофизическими расчётами, при столь невысокой плотности подводимой мощности время разогрева битума от исходной температуры +10 – +25 ºС до температуры разжижения ~+130 ºС оказалось бы неприемлемо большим, а прогрев поверхностного слоя недостаточным. Последнее, в условиях проведенных вспомогательных экспериментов с рупором меньших размеров и сниженной мощностью СВЧ излучения, приводило к вскипанию лёгких фракций битумного компаунда в его объёме под тонким и относительно холодным поверхностным слоем. Следствием было периодическое вспучивание поверхностного слоя с последующим мгновенным его разрывом и разбрызгиванием расположенного под ним уже разжиженного битумного компаунда внутрь объёма рупора и на его стенки.

В связи с этим было принято решение отказаться от общего волновода-сумматора со значительной площадью квадратного сечения. Вместо него была использована сборка из двух или четырех параллельно и вертикально расположенных волноводов прямоугольного сечения с наружными размерами 8×6 см каждый и толщиной стенки 2 мм. Внутренняя ширина волновода 7,6 см выбрана исходя из того, что она при частоте излучения 2,45 ГГц должна быть больше минимальной, или критической. Выбор внутренней высоты волновода 5,6 см определялся длиной излучателя самого магнетрона, равной 4,2–4,4 см, а также стандартными типоразмерами бесшовных труб прямоугольного сечения из немагнитных металлов.

Кроме того, в зазоре между волноводами сборки размещался направляющий патрубок шнекового насоса с креплением, обеспечивающим строго вертикальное положение насоса в рабочем положении и возможность перемещения патрубка насоса со шнеком и приводом по вертикали.

Размещение шнекового насоса между волноводами, кроме жёсткой фиксации по отношению к вертикали, позволило одновременно обеспечить его прогрев при работе установки.

При ширине рупора в выходном сечении 0,6 м по каждой из сторон, её отношение к максимальному габаритному размеру сборки волноводов 0,16 м составило бы 3,75. Эта величина находится в полученных ранее минимальных оценочных пределах, то есть не менее 3,5.

Внешний вид одного прямоугольного волновода сечением 80×60 мм представлен на рис. 6 а, разрез по продольной оси – на рис. 6 б. Там же схематично показано расположение магнетрона.

Результаты расчетного моделирования показали, что оптимальная длина такого волновода составляет 220±5 мм (от среза до внутренней поверхности торцевой стенки). В расчёте была

учтена защитная диэлектрическая радиопрозрачная вставка (рис. 6 б) длиной 100 мм с диэлектрической проницаемостью 1,242, закрывающая выход волновода. Эта вставка служит для предотвращения попадания аэрозолей битума внутрь волновода при работе установки. Вставка является термостойкой и при необходимости легко заменяется без демонтажа других элементов конструкции.

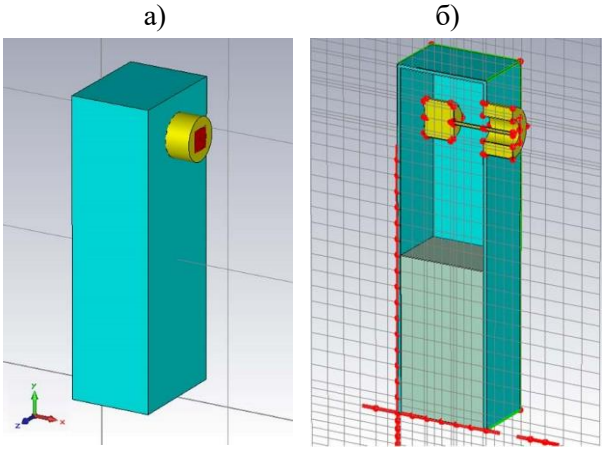



**Рис. 6.** Внешний вид (а) и разрез по продольной оси (б) одного волновода сечением 80×60 мм

При указанных параметрах коэффициент отражения СВЧ излучения в сторону магнетрона не превышает 0,25. Полная излучающая эффективность волновода с учётом поглощения части СВЧ мощности металлом стенок составила 0,94. В то же время направленность излучения такого волновода невысока и не превышает 4,6 дБ. Таким образом, рупор и шнековый насос являются элементами, существенно необходимыми для формирования узконаправленного излучения.

С целью получения более узкой диаграммы направленности выполнена оценка возможности уменьшения размеров рупора со стороны волноводов за счет увеличения отношения выходных размеров рупора к его входным размерам.

Была рассмотрена конструкция с волноводами, у которых сечение с величины 80×60 мм в зоне крепления магнетронов уменьшается до сечения 80×30 мм по направлению к излучающему открытому срезу, вблизи которого так же, как и в предыдущем случае, размещалась защитная диэлектрическая вставка (рис. 7). Оптимальная длина такого волновода также составила 220±5 мм с длиной защитной вставки 110 мм.

Полная излучающая эффективность такого волновода с учётом поглощения части СВЧ мощности металлом стенок оказалась ниже, чем у простого прямоугольного волновода, и не превысила 0,91. А минимально достижимый коэффициент отражения СВЧ излучения в сторону магнетрона в этом случае оказался выше и составил 0,28–0,29. Эта величина уже была ближе к предельно допустимой по условиям нормальной эксплуатации магнетрона, особенно при продолжительном непрерывном режиме работы.

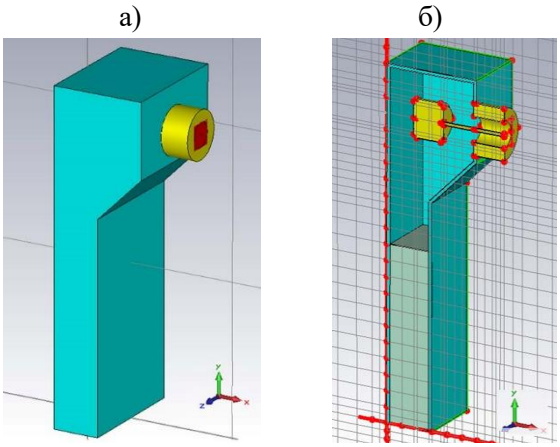



**Рис. 7.** Внешний вид (а) и разрез по продольной оси (б) волновода сечением 80×30 мм

## Расчетная оценка параметров рупорного излучателя

С целью минимизации вычислительных ресурсов и конструктивного исполнения с учетом симметрии поля, создаваемого двумя магнетронамидля дальнейшего исследования принята экспериментальная сборка с двумя магнетронами единичной мощностью 3 кВт и полной выходной СВЧ мощностью не менее 5,1 кВт. Итоговое целевое значение излучающей эффективности сборки совместно с рупором и прочими конструкционными элементами принято не ниже 0,85 и подтверждено расчётами. Габаритные размеры такой волноводной сборки в плане составили 160×80 мм.

Выполненный численный расчёт геометрических параметров рупорного излучателя-сумматора позволил определить оптимальную высоту рупора и углы наклона стенок рупора по отношению к вертикальной оси системы. При проведении расчёта было принято следующее:

- система отсчёта – декартова и выбрана таким образом, что ось OY направлена вертикально вверх;
- вертикальные плоскости симметрии сборки: $Z = 0$ и $X = 0$;
- сборка волноводов в плане представляет пря-

моугольник со сторонами *a* и *b* по осям, соответственно, *X* и *Z*;

- высота рупора по оси *Y*, от среза волноводов до выходного сечения рупора, равна *h*;
- рупор в выходном сечении представляет собой квадрат со стороной *c*.

В этом случае две противоположные стенки рупора имеют угол наклона α по отношению к вертикали, две другие – угол наклона β, при этом величины углов связаны с линейными параметрами соотношениями:

$$\operatorname{tg}\alpha = (c - a)/2h; \quad \operatorname{tg}\beta = (c - b)/2h.$$

Очевидно также, что если a > b, то α < β.

В нашем случае a = 160 мм, b = 80 мм – на основании выполненных ранее расчётов, c = 600 мм – как заданный целевой параметр (граничное условие).

Из ранее выполненных оценок следует, что углы наклона стенок рупорного излучателя α и β следует варьировать в пределах 10–35о. Отношение линейных размеров выходного среза рупора c по отношению к характерным линейным размерам a и b сборки волноводов в горизонтальной плоскости можно оценить величиной, не менее чем ~3,5. При выбранных параметрах a = 160 мм, b = 80 мм, c = 600 мм последнее требование уже выполнено.

Эти условия в совокупности должны были обеспечить концентрацию не менее, чем 95 % мощности СВЧ излучения в заданном объёме битума и его поглощение в этом объёме. Справедливость данных предположений должна быть в дальнейшем подтверждена результатами численного моделирования.

Таким образом, единственным вариационным параметром, по которому необходимо выполнить оптимизацию, является высота рупорной части h. Целевыми параметрами оптимизации являются одновременно минимум отражения мощности к магнетронам и получение требуемой диаграммы направленности.

Из выражения для tg α и tg β определяются верхний и нижний пределы изменения значений параметра h, а именно:

$$hMIN = (c - a) / 2\operatorname{tg}(\alpha MAX) = 320 \text{ мм};$$

$$hMAX = (c - b) / 2\operatorname{tg}(\beta MIN) = 1470 \text{ мм}.$$

Кроме того, необходимо учитывать, что чем больше высота рупора, тем больше потери СВЧ мощности в его металле, обладающем конечной проводимостью. Не говоря о том, что с увеличением линейных размеров установка получается более громоздкой и требуемая высота подъёма битума шнековым насосом также возрастает. Поэтому расчёты велись, начиная от h = hMIN в направлении возрастания параметра h до получения приемлемых расчётных параметров установки в целом.

Критерием завершения расчётов было получение настолько узкой диаграммы направленности, чтобы не менее 95 % СВЧ мощности, отражённой от днища хранилища и рассеянной вверх в объёме битума, вновь попадало в рупор и отражалось вниз.

Максимально допустимый шаг изменения параметра h был оценен не более 15,3 мм, что соответствует 1/8 длины волны в вакууме при частоте излучения 2,45 ГГц. Практически же он был ещё меньше: Δh = 10 мм. Это обусловлено тем, что прямая электромагнитная волна, генерируемая магнетроном, и отражённая – когерентны.

В результате их интерференции, при увеличении параметра h наблюдается периодическое изменение суммарного коэффициента отражения СВЧ излучения в сторону магнетрона. Период таких осцилляций примерно равен половине длины волны (61,2 мм). Таким образом, на период колебаний должно приходиться не менее 4–5 расчётных точек.

Наличие подобных осцилляций, особенно вблизи нижней границы высот рупора hMIN, было подтверждено численным моделированием в процессе оптимизации. Диапазон изменений коэффициента отражения СВЧ излучения в сторону магнетрона по напряжённости поля достигал ±45 % от средней величины. С увеличением высоты рупора h эти осцилляции несколько уменьшались.

По результатам серии расчётов было установлено, что минимально допустимая высота рупора h составляет 360 мм, но при этом утечка мощности всё же превышала 5 %. Оптимальная высота, при которой соблюдаются все перечисленные выше требования, составила 540 мм, минимально приемлемая – 420 мм. При дальнейшем увеличении высоты рупора, а значит, площади его стенок, джоулевы потери СВЧ мощности в его стенках возрастали и эффективность системы по излучаемой СВЧ мощности падала.

При этом оптимальный наклон стенок рупора по отношению к вертикальной оси сборки составил 22–26о, что не противоречит сделанным ранее предварительным оценкам. Полная излучательная эффективность системы с учётом джоулевых потерь мощности в металле составила ~86 %, коэффициенты отражения в сторону магнетронов по амплитуде напряжённости СВЧ поля – менее 0,3, диаграмма направленности – не хуже 17 дБ.

## Результаты численных расчетов

Определены следующие оптимальные параметры экспериментальной установки.

1) Сборка из двух параллельно расположенных одинаковых прямоугольных волноводов наружными размерами в поперечном сечении 80×60 мм каждый, длина волновода – ~220 мм, зазор между смежными волноводами – 40 мм для размещения шнекового насоса.
2) Габаритные размеры сборки волноводов в плане – 160×80 мм.
3) На каждом волноводе установлен один магнетрон частотой 2,45 ГГц и максимальной выходной мощностью по СВЧ излучению 3 кВт.
4) Питание каждого магнетронного генератора – независимое индивидуальное от штатного источника серийного промышленного изготовления.
5) Система охлаждения магнетрона – водяная.
6) Рупорный излучатель-сумматор: четырехгранный конический, выполненный из тонкого листового немагнитного металла. Форма в верхнем сечении – прямоугольная, с внутренними размерами 160×80 мм. Форма в нижней части (выходная плоскость) – квадрат со стороной 600 мм. Высота рупора: оптимальная – 540 мм, минимальная – 420 мм.
7) Насос для откачки битума – шнек в вертикальной цилиндрической трубе. Труба зафиксирована в вертикальном положении и может быть принудительно перемещаема по вертикали внутри рупора на заданную высоту. Начальное рабочее положение по высоте – шнек касается поверхности битума.

Ниже подробно приведены результаты численных расчётов окончательного варианта экспериментальной сборки с оптимальными параметрами.

## Окончательный вариант рупорного излучателя

На основе результатов расчетного моделирования принята следующая конструкция сборки волноводов с рупором и шнековым насосом (рис. 8). Использована сборка из двух прямоугольных волноводов. На каждом из волноводов в верхней части смонтирован магнетронный генератор с рабочей частотой 2,45 ГГц и выходной СВЧ мощностью до 3 кВт.

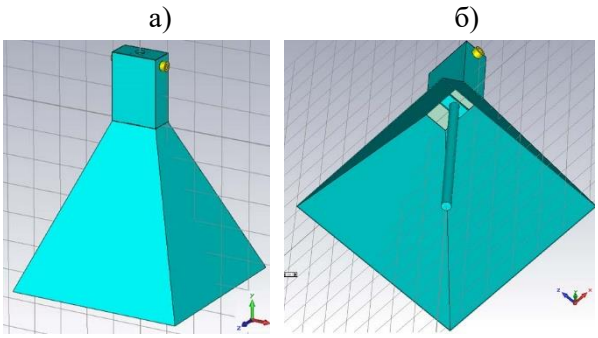



**Рис. 8.** Принятая конструкция сборки волноводов с рупором и шнековым насосом: вид сбоку (а); вид снизу (б)

Снизу волноводы закрыты изнутри защитными вставками из радиопрозрачного диэлектрического материала, предотвращающие возможное попадание паров битумного компаунда и аэрозолей, содержащих частицы битума, на внутренние стенки волноводов и, далее, на излучатели магнетронных генераторов. Сечение рупора в нижней части представляет в плане квадрат со стороной 0,6 м.

Высота и наклон стенок рупора, а также длины волноводов определены расчётным путём, исходя из условий оптимального разогрева битума, а именно:

- максимально равномерная плотность СВЧ излучения на выходном срезе рупора;
- получение по возможности узкой диаграммы направленности за пределами рупора (вертикально вниз);
- минимальный коэффициент обратного отражения СВЧ излучения в волноводы в сторону магнетронов.

Последнее условие позволило упростить конструкцию экспериментальной модели, отказавшись от дополнительных согласующих устройств при соблюдении требуемых режимных характеристик эксплуатации магнетронов.

Расчётное моделирование выполнено с использованием пакета программ CST Microwave Studio [8]. В силу симметрии и линейности системы, предусматривающее справедливость принципа суперпозиции, расчёты выполнены для условий, когда в работе находится только один магнетрон из двух, а именно: правого волновода (рис. 9, 10). Результаты для работы левого магнетрона зеркально симметричны.

Так как СВЧ излучение магнетронов взаимно некогерентно, при работе обоих генераторов интерференцией СВЧ волн можно пренебречь, т.е.

пространственно суммировать интенсивности колебаний, создаваемых каждым из магнетронов.

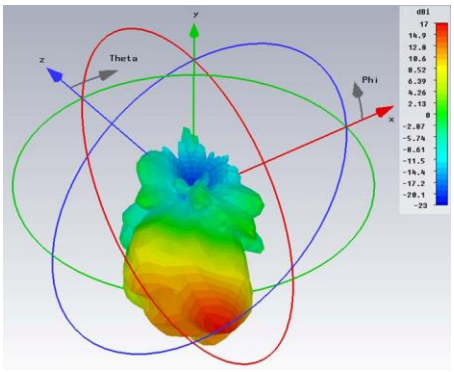



**Рис. 9.** Диаграмма направленности (вид снизу)

Диаграмма направленности при работе одного магнетрона представлена на рис. 11. Из рисунка видно, что симметрия излучения относительно вертикальной оси вполне удовлетворительна, а направленность рупорного излучателя в дальней зоне составляет более +17 dB.

Конфигурация поля внутри рупора в вертикальных секущих плоскостях представлена на рис. 10. СВЧ поле представляет собой бегущую электромагнитную волну. При этом шнековый насос, расположенный внутри рупора, является своего рода дополнительным пространственным концентратором электромагнитного излучения. Это позволяет сконцентрировать СВЧ излучение внутри рупора с максимумом внутри битума и вблизи его поверхности, расположенным на продольной оси рупора и под шнековым насосом.

а) б)

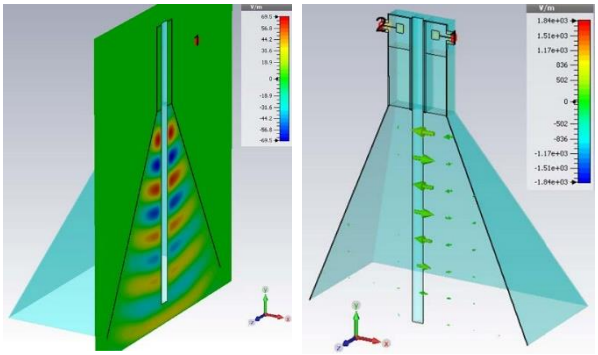


**Рис. 10.** Конфигурация поля внутри рупора: в *X*-плоскости (а); в *Z*-плоскости (б)

На рис. 11 представлено пространственное распределение интенсивности, а также *X*- и *Z*-компонент амплитуды электрического поля в бегущей СВЧ волне в вертикальной секущей плоскости *Z* = -30 мм. Данная плоскость расположена непосредственно за шнековым насосом.

а) б) в)

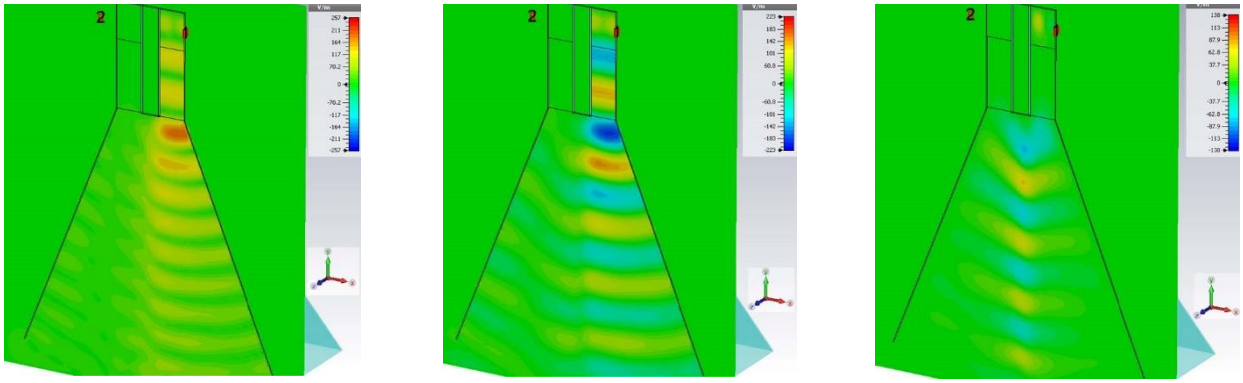


**Рис. 11.** Пространственное распределение интенсивности, а также *X*- и *Z*-компонент амплитуды электрического поля в бегущей СВЧ волне в различных вертикальных секущих *Z*- плоскостях: (а) – интенсивность; (б) – *Z*-компонента поля; (в) – *X*-компонента поля

На рисунке схематически показаны границы рупорного излучателя и волноводы с установленными на них магнетронами *X*- и *Z*-компоненты электрического поля, лежащие в горизонтальной плоскости, имеющие соизмеримые по величине напряжённости. Продольная *Y*-компонента электрического поля по величине, как минимум, на порядок меньше поперечных и поэтому на рисунках не показана.

На рис. 12 изображена конфигурация СВЧ излучения, создаваемого одним из магнетронов вблизи плоскости выходного среза рупорного излучателя. Для наглядности представлена не только напряжённость, но и направление силовых

линий электрического поля в векторном виде.

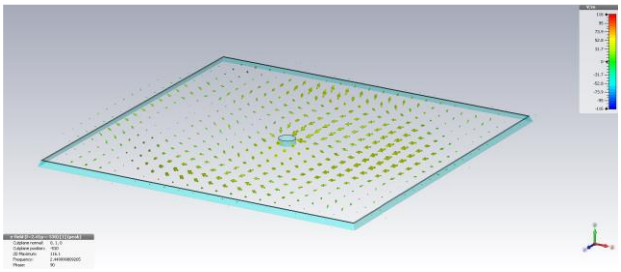


**Рис. 12.** Конфигурация СВЧ-излучения, создаваемого одним из магнетронов вблизи плоскости выходного среза рупорного излучателя

На рисунке видно, что излучение достаточно равномерно распределено в пределах секущей плоскости. Незначительный провал в интенсивности в левой части рисунка компенсируется работой второго магнетрона, о чём было сказано выше.

На рис. 13 показаны абсолютная величина и направление электрической компоненты СВЧ излучения на глубине 0,02 м под поверхностью битума.

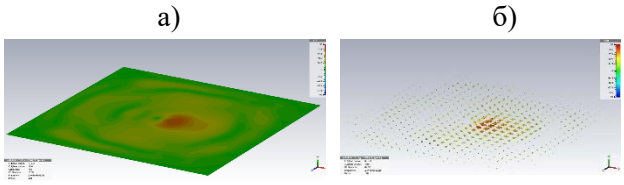



**Рис. 13.** Абсолютная величина (а) и направление (б) электрической компоненты СВЧ излучения на глубине 0,02 м под поверхностью битума

На рисунке хорошо видна роль шнекового насоса, расположенного внутри рупорного излучателя над поверхностью битумного компаунда, как концентратора СВЧ излучения. Это свойство позволяет добиться начального разжижения битумного компаунда в непосредственной близости от шнекового насоса. Регулируя глубину погружения насоса при работающих генераторах СВЧ поля, можно задавать оптимальную форму ванны расплавленного битумного компаунда и, тем самым, достигнуть наивысшей скорости разжижения и откачки битумного компаунда из хранилища.

## Заключение

Разработанная модель СВЧ нагрева радиоактивного битумного компаунда позволила определить конфигурацию и основные геометрические параметры устройства для его плавления и последующего извлечения из долговременного хранилища.

При разработке расчетной модели использовались характеристики магнетронов промышленного серийного изготовления.

Полученные в результате моделирования оптимальные геометрические размеры СВЧ излучателя, обеспечивающего формирование ванны расплава битумного компаунда с заданными характеристиками, использованы при создании экспериментальной установки СВЧ плавления радиоактивного битумного компаунда.

Результаты расчетного моделирования рупорного излучателя в сборе с индивидуальными прямоугольными волноводами, на которых размещены магнетроны, и цилиндрической трубой-корпусом шнекового насоса легли в основу создания полупромышленной установки СВЧ плавления и извлечения радиоактивного битумного компаунда.

## Список литературы

1. Никифоров А.С. Установка для битумирования жидких радиоактивных отходов Ленинградской АЭС / А.С. Никифоров, А.И. Борзунов, А.Ф. Вотинцев, В.И. Давыдов и др. // Атомная энергия, 1986. – Т. 61. – Вып. 3. – С. 162–166.
2. Никифоров А.С. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов / А.С. Никифоров, В.В. Куличенко, М.И. Жихарев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 184 с.
3. Варлаков А.П., Суханов Л.П. Проблемы обращение с битумированными радиоактивными отходами Ленинградской АЭС. – ВНИИНМ им. А.А. Бочвара, Санкт-Петербург, 2015. – 19 с.
4. Обращение с РАО, обеспечение поддержания ВХР и дезактивации, в части: анализ состояния битумного компаунда хранилищ наливного типа Ленинградской АЭС для подтверждения безопасности его дальнейшего хранения и разработке технических предложений по разгрузке хранилищ. Отчёт. Обработка результатов проб битумного компаунда из отсека АЛ-559. Инв. № 225. – ЗАО «Инженерный центр «ЭКСИМЕР», 2008.
5. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности» (НП-019-15). – Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 июня 2015 года № 242.
6. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» (НП-093-14). – Утв. приказом Федеральной

службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 декабря 2014 года № 572.
7. LG Magnetron 2M290-04WJ 3000W Water Cooling Industrial Magnetron For Microwave Oven Parts [Электронный ресурс] – Электрон. текстовые, графические данные. Режим доступа: https://m.gobizkorea.com/mobile/mobileGoodsDetail.do?goods_no=GS2018012108935#expn (дата обращения 17.08.2021).
8. Моделирование антенн и элементов тракта: Учебно-методическое пособие для выполнения курсовых и самостоятельных работ по учебным курсам «Устройства СВЧ и антенны» и «Антенно-фидерные устройства» / Под ред. Шишакова К.В. – Ижевск: ИжГТУ, 2009. – 127 с.

## References

1. Nikiforov A.S., Borzunov A.I., Votincev A.F., Davydov V.I. i dr. *Ustanovka dlja bitumirovanija zhidkih radioaktivnyh othodov Leningradskoj AJeS* [Installation for bitumenation of liquid radioactive waste of the Leningrad NPP] *Atomnaja jenergija*, 1986, No. 61, Iss. 3, P. 162–166. (in Russian).
2. Nikiforov A.S., Kulichenko V.V., Zhiharev M.I. *Obezvrezhivanie zhidkih radioaktivnyh othodov*. – M.: Jenergoatomizdat, 1985. 184 s. (in Russian).
3. Varlakov A.P., Suhanov L.P. *Problemy obrashhenie s bitumirovannymi radioaktivnymi othodami Leningradskoj AJeS*. – VNIINM im. A.A. Bochvara, Sankt-Peterburg, 2015, 19 p. (in Russian).
4. Obrashhenie s RAO, obespechenie podderzhanija VHR i dezaktivacii, v chasti: analiz sostojanija bitumnogo kompaunda hranilishh nalivnogo tipa Leningradskoj AJeS dlja podtverzhdenija bezopasnosti ego dal'nejshego hranenija i razrabotke tehnicheskih predlozhenij po razgruzke hranilishh. Otchjot. Obrabotka rezul'tatov prob bitumno-go kompaunda iz otseka AL-559. Inv. № 225. ZAO "Inzhenernyj centr "JeKSIMER" Publ., 2008. (in Russian).
5. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovanija atomnoj jenergii "Sbor, pererabotka, hranenie i kondicionirovanie zhidkih radioaktivnyh othodov. Trebova-nija bezopasnosti" (NP-019-15). Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po jekolo-gicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 25 ijunja 2015 goda № 242. (in Russian).
6. Federal'nye normy i pravila v oblasti ispol'zovanija atomnoj jenergii "Kriterii priemlemosti radioaktivnyh othodov dlja zahoronenija" (NP-093-14). Utv. prikazom Federal'noj sluzhby po jekologicheskomu, tehnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 15 dekabrja 2014 goda № 572. (in Russian).
7. LG Magnetron 2M290-04WJ 3000W Water Cooling Industrial Magnetron For Microwave Oven Parts. Available at: https://m.gobizkorea.com/mobile/mobile GoodsDetail.do?goods_no=GS2018012108935#expn (accessed 17.08.2021).
8. Modelirovanie antenn i jelementov trakta: Uchebno-metodicheskoe posobie dlja vypolnenija kursovyh i samostojatel'nyh rabot po uchebnym kursam "Ustrojstva SVCh i antenny" i "Antenno-fidernye ustrojstva". Pod red. Shishakova K.V. Izhevsk, IzhGTU Publ., 2009, 127 p. (in Russian).

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 631.452

# Агрохимическая оценка плодородия почв ООО «Севастопольский»

А.М. Городецкая[1], Тищенко Т.Н.[2], Заблоцкая Е.В.[3],
Дербасова Н.М.[4], Гавриш О.П[5]

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, nastya-gorodetskaya2001@mail.ru[1]*

Статья поступила 19.01.2022 г.; после обработки 21.01.2022 г.

***Аннотация***

*Приведена оценка плодородия почв сельскохозяйственного кооператива ООО «Севастопольский». По результатам анализа почвенных участков с применением программного обеспечения геоинформационной системы QGIS составлены картограммы распределения анализируемых элементов и веществ, характеризующих почвенное плодородие. Рассчитан комплексный показатель почвенного плодородия, который составил 89,3 балла.*

*Ключевые слова*: почва, плодородие, геоинформационная система QGIS.

# Agrochemical assessment of soil fertility LLC "Sevastopol"

Gorodetskaya A.M.[1], Tishchenko T.N.[2], Zablotskaya E.V.[3],
Derbasova N.M.[4], Gavrish O.P.[5]

*Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st, Sevastopol, 299053, Russia, nastya-gorodetskaya2001@mail.ru[1]*

*Received* 19.01.2022 *y.; received in final form* 21.01.2022 *y.*

***Abstract***

*The article presents an assessment of soil fertility of the agricultural cooperative LLC "Sevastopol". Based on the results of the analysis of soil plots using the software of the geoinformation system QGIS, cartograms of the distribution of the analyzed elements and substances characterizing soil fertility were compiled. The complex indicator of soil fertility was calculated, which amounted to 89.3 points.*

*Keywords:* soil, fertility, geoinformation system QGIS.

## Введение

Сохранение и защита почвенного покрова от деградации, экологическая оценка продукции в условиях техногенеза и рациональное использование природно-сельскохозяйственных ресурсов относится к национальным интересам государства и общества [1]. Падение плодородия почв и, как следствие, снижение уровня урожайности сельскохозяйственных культур вызвано, как правило, неправильной технологией обработки почвы, применением удобрений, вследствие отсутствия данных степени обеспеченности почв элементами питания [2].

Агрохимическое обследование земельных участков обеспечивает землепользователя информацией по содержанию подвижных элементов питания растений, а именно: обменного калия, подвижного фосфора, гумуса, а также дает рекомендации эффективного использования

средств химизации в целях сохранения и воспроизводства плодородия почв с учетом новых условий хозяйствования. В среднем для контроля и поддержания плодородия почв необходимо проводить агрохимическое обследование один раз в 5-7 лет [3].

В работе представлены результаты агрохимического обследования почв территории ООО «Севастопольский». Исследован участок в районе поселка Сахарная Головка, Республики Крым, в геоморфологическом отношении который приурочен к горному Крыму и по рельефу представляет долину р. Черная. Природные условия данной зоны – климат, рельеф, характер почвообразующих пород и глубина залегания грунтовых вод, способствуют формированию аллювиально-луговых почв. В соответствии с картой районирования почв Крымского полуострова, территория приурочена к юго-западному приморскому лесостепному подрайону, следовательно, в почвенном покрове исследуемого района преобладают следующие виды почв – луговые карбонатные, дерново-карбонатные почвы на элювии плотных карбонатных пород и коричневые горные карбонатные почвы (тяжелоглинистые).

## Методика исследований

Методика агроэкологической оценки плодородия почв сельскохозяйственных угодий ООО «Севастопольский» включает шесть этапов:

На первом этапе – исследование рельефа местности ООО «Севастопольский», обозначение границ участка поля [4, 5]. Площадь обозначенного элементарного участка составила 52 тыс. м2.

В ходе второго этапа разработан маршрут отбора точечных проб на исследуемом элементарном участке [4, 5]. Схема маршрута представлена на рис. 1.



**Рис.1.** Маршрут отбора проб почвы на элементарном участке ООО «Севастопольский»

В рамках третьего этапа было отобрано 15 объединенных проб с глубины пахотного слоя (0-30 см) и промаркированы смешанные образцы почв массой 0,45 кг каждая [4, 5].

На пятом этапе исследования проводилась пробоподготовка почвенных образцов для их дальнейшего анализа [4, 5]. Для этого почвенные образцы доводили до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 45-45 °С с последующим доведением до однородного состава лабораторной мельнице.

Заключительный этап - проведение анализа проб почвы. В ходе данного этапа, методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «КАПЕЛЬ-10», был проведен анализ почвенных образцов с целью определения массовой доли $P_2O_5$ и $K_2O$ [6, 7]. Также, в рамках данного исследования, было проведено определение процентного содержания органического вещества в почвенных образцах (при помощи гравиметрического метода) и pH почвенной вытяжки [8, 9].

## Анализ и оценка результатов

Результаты исследования содержания в почвенной вытяжке водорастворимых форм фосфатионов и катионов калия, органического вещества, а также кислотности почвы для исследуемого участка представлены в табл. 1.

***Таблица 1.*** *Результаты анализа элементов плодородия для Участка №1 ООО «Севастопольский»*

| № образца | $P_2O_5$, мг/кг | $K_2O$, мг/кг | Органическое вещество, % | pH |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 53 | 1050 | 2,92 | 7,9 |
| 2 | 55 | 680 | 2,79 | 8,1 |
| 3 | 44 | 485 | 2,05 | 8,3 |
| 4 | 73 | 340 | 2,23 | 8,3 |
| 5 | 84 | 260 | 2,20 | 8,2 |
| 6 | 46 | 690 | 2,46 | 8,1 |
| 7 | 80 | 640 | 3,29 | 8,1 |
| 8 | 116 | 520 | 4,36 | 8,7 |
| 9 | 13 | 165 | 1,20 | 8,7 |
| 10 | 10 | 160 | 1,06 | 8,5 |
| 11 | 20 | 200 | 1,27 | 7,9 |
| 12 | 74 | 620 | 3,97 | 7,9 |
| 13 | 229 | 850 | 6,25 | 7,9 |
| 14 | 174 | 810 | 4,86 | 8,1 |
| 15 | 153 | 900 | 6,63 | 8,3 |

Из анализа представленных данных видно, что:

1) Обеспеченность почв органическим веще-

ством в исследуемом слое (0-30 см) – низкая, содержание органического вещества составляет 3,17 %;

2) Обеспеченность почв подвижным фосфором – средняя, и составляет 81,6 мг/кг;
3) Обеспеченность почв подвижным калием – очень высокая, и составляет 558 мг/кг;
4) Реакция почвенного раствора – среднещелочная, pH = 8,2.

На основании полученных данных, при помощи программного обеспечения QGIS были составлены картограммы распределения анализируемых элементов ($P_2O_5$, $K_2O$, органическое вещество и pH) на исследуемом почвенном участке сельскохозяйственного кооператива ООО «Севастопольский» (рис. 2-5).

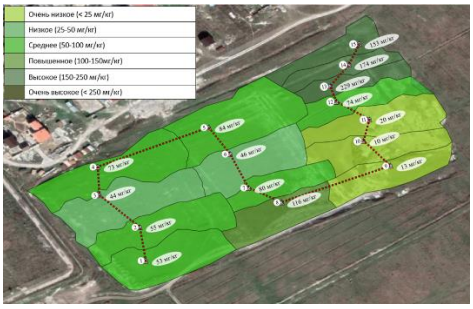



**Рис. 2.** Картограмма распределения $P_2O_5$ (мг/кг) на исследуемом участке ООО «Севастопольский»




**Рис. 3.** Картограмма распределения K2O (мг/кг) на исследуемом участке ООО «Севастопольский»




**Рис. 4.** Картограмма содержания органического вещества (%) в почве исследуемого участка ООО «Севастопольский»

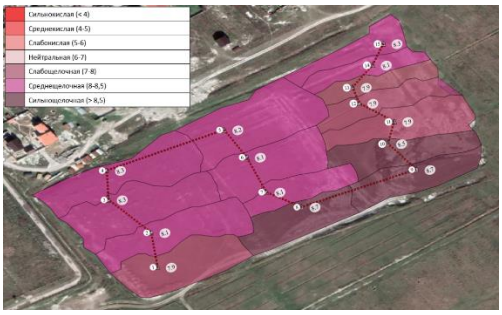



**Рис. 5.** Картограмма значений pH почвы исследуемого участка ООО «Севастопольский»

Главная ценность таких картограмм заключается в точечном отображении колебаний концентраций анализируемых элементов или значений pH, что позволяет более точно скорректировать объемы необходимых культивационных работ. Они позволяют с высокой точностью скорректировать не только необходимость внесения в почву удобрений, но и подробно рассчитать минеральную и органическую составную вносимых удобрений и их pH, в зависимости от величины показателей в определенных точках почвенного участка.

Также в работе рассчитан комплексный показатель почвенного плодородия (ППП) [10]. Показатель плодородия для исследуемого почвенного участка сельскохозяйственного кооператива ООО «Севастопольский» был рассчитан по формуле:

$$К_{пп} = [((Г_{ф.} / Г_{опт.})+(P_2O_{5ф.} / P_2O_{5опт.})+(K_2O_{ф.} / K_2O_{опт.})+(pH_{опт.} / pH_{ф.})) / 4] * S_{участка}, \quad (1)$$

где:

$К_{пп}$ – показатель почвенного плодородия для каждого типа почв;

Г (гумус), pH, $P_2O_5$, $K_2O$ – агрохимические показатели;

ф. – фактические значения агрохимических показателей;

опт. – оптимальные значения агрохимических показателей.

$S_{участка}$ - площадь обозначенного элементарного участка, 52 тыс. м$^2$

Оптимальное значение агрохимических показателей для почв данного района [11]:

1) $P_2O_5$ – 200 (мг/кг);
2) $K_2O$ – 250 (мг/кг);
3) Органическое вещество – 3,75 %;
4) pH – 6.

Значение ППП по результатам расчета составило 89,3 балла, что характеризует почву как высокоплодородную. Для сравнения следует сказать, что по результатам агрохимического обследования 2013-2017 г. данный показатель по

Республике Крым составлял в среднем 60-65 баллов. А показатель почвенного плодородия ниже 40-60 баллов характеризует почвы как неплодородные или низкоплодородные [12].

## Заключение

В ходе агрохимического исследования почв сельскохозяйственного кооператива ООО «Севастопольский» был проведен анализ почвенных образцов с целью определения массовой доли растворимых форм фосфора и калия, органического вещества и pH. Таким образом, на основании полученных данных, при помощи программного обеспечения QGIS, были составлены картограммы распределения исследуемых элементов на элементарном почвенном участке. Также, в работе был рассчитан комплексный показатель почвенного плодородия (ППП), который составил 89,3 балла, что позволяет охарактеризовать почву исследуемого участка как высокоплодородную.

## Список литературы


1. Родоманская С.А. Агроэкологическая оценка деградационных трансформаций сельскохозяйственных земель в контексте обеспечения продовольственной безопасности // МСХ. – 2018. – №6. – С. 71-75. – Текст: электронный. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/agroekologicheskaya-otsenka-degradatsionnyh-transformatsiy-selskohozyaystvennyh-zemel-v-kontekste-obespecheniya-prodovolstvennoy (дата обращения: 14.12.2021);
2. Карабутов А.П. Влияние элементов агротехнологии на калийный режим почвы в длительных опытах / А.П. Карабутов, Г.И. Уваров // Региональные геосистемы. – 2015. – №3. – Текст: электронный. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-elementov-agrotehnologii-na-kaliynyy-rezhim-pochvy-v-dlitelnyh-opytah (дата обращения: 14.12.2021);
3. Мотузова Г.В. Экологический мониторинг почв: Учебник / Г.В. Мотузова, О.С. Безуглова. – М.: Изд-во Академический Проект; Гаудеамус, 2007. – 237 с. – Текст: электронный. – URL: http://soil.msu.ru/attachments/article/1366/Экологический%20мониторинг%20почв.pdf (дата обращения: 14.12.2021);
4. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору почв; - Взамен ГОСТ 17.4.3.01-83; введ. 2019-01-01. – М.: Изд-во Стандартинформ, 2021. – Текст: электронный. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200159508 (дата обращения: 14.12.2021);
5. ГОСТ 17.4.4.02-2017. Охрана природы. Почвы. Методы отбора и подготовки проб для химического, бактериологического, гельминтологического анализа. – Взамен ГОСТ 17.4.4.02-84; введ. 2019-01-01. – М.: Изд-во Стандартинформ, 2021. – Текст: электронный. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200158951 (дата обращения: 14.12.2021);
6. ПНД Ф 16.1:2:2.3:2.2.69-10. Методика из мерений массовой доли водорастворимых форм хлорид-, сульфат-, оксалат-, нитрат-, фторид-, формиат-, фосфат-, ацетат- ионов в почвах, грунтах тепличных, глинах, торфе, осадках сточных вод, активном иле, донных отложениях методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель»; введ. 2010-01-01. – М., 2010. – Текст: непосредственный (дата обращения: 14.12.2021);
7. ПНД Ф 16.1:2:2.2:2.3.74-2012. Количественный химический анализ почв. Методика измерений массовой доли водорастворимых форм катионов аммония, калия, натрия, магния, кальция в почвах, грунтах, глине, торфе, осадках сточных вод, донных отложениях методом капиллярного электрофореза с использованием системы капиллярного электрофореза «Капель»; введ. 2012-01-01. – М., 2012. – Текст: непосредственный (дата обращения: 14.12.2021);
8. ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. – Взамен ГОСТ 26213-8; введ. 1993-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1992. – Текст: электронный. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200023481 (дата обращения: 14.12.2021);
9. ГОСТ 26423-85. Почвы. Методы определения удельной электрической проводимости, pH и плотного остатка водной вытяжки; введ. 1986-01-01. – М.: Изд-во Стандартинформ, 2011. – Текст: электронный. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200023484;
10. Об утверждении Методики расчета плодородия в субъекте Российской Федерации: Приказ Минсельхоза РФ от 6 июля 2017 г. №325 // ГАРАНТ. – 2017. – 4 авг. – Текст: электронный. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71624168/;
11. Лапа В.В. Плодородие почв Республики Беларусь, проблемы и перспективы // Почвоведение и агрохимия. – 2010. – №1 (44). – Текст: электронный. – URL: http://aw.belal.by/russian/science/soilandagro_pdf/44/44-full.pdf (дата обращения: 14.12.2021);
12. Драган Н.А. Сравнительная оценка качества почвенных ресурсов крыма // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. – 2011. – №2-1. – С. 260-266. – Текст: электронный. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-otsenka-kachestva-pochvennyh-resursov-kryma

(дата обращения: 14.12.2021).

## References


1. Rodomanskaya S.A. Agroecological assessment of degradation transformations of agricultural lands in the context of ensuring food security // Ministry of Agriculture. – 2018. – No. 6. – pp. 71-75. – Text: electronic. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/agroekologicheskaya-otsenka-degradatsionnyh-transformatsiy-selskohozyaystvennyh-zemel-v-kontekste-obespecheniya-prodovolstvennoy (date of application: 14.12.2021);
2. Karabutov A.P. The influence of agro-technology elements on the potash regime of the soil in long-term experiments / A.P. Karabutov, G.I. Uvarov // Regional geosystems. – 2015. – No. 3. – Text: electronic. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vliyanie-elementov-agrotehnologii-na-kaliynyy-rezhim-pochvy-v-dlitelnyh-opytah (date of application: 14.12.2021);
3. Motuzova G.V. Ecological monitoring of soils: Textbook / G.V. Motuzova, O.S. Bezuglova. – M.: Publishing house Academic Project; Gaudeamus, 2007. – 237 p. – Text: electronic. – URL: http://soil.msu.ru/attachments/article/1366/Экологический%20мониторинг%20почв.pdf (date of application: 12/14/2021);
4. GOST 17.4.3.01-2017. Nature conservation. Soil. General requirements for soil selection; – Instead of GOST 17.4.3.01-83; introduction. 2019-01-01. – Moscow: Standardinform Publishing House, 2021. – Text: electronic. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200159508 (date of application: 14.12.2021);
5. GOST 17.4.4.02-2017. Nature conservation. Soil. Methods of sampling and preparation of samples for chemical, bacteriological, helminthological analysis. – Instead of GOST 17.4.4.02-84; introduced. 2019-01-01. – Moscow: Standardinform Publishing House, 2021. – Text: electronic. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200158951 (date of application: 14.12.2021);
6. HDPE F 16.1:2:2.3:2.2.69-10. Method of measuring the mass fraction of water-soluble forms of chloride-, sulfate-, oxalate-, nitrate-, fluoride-, formate-, phosphate-, acetate- ions in soils, greenhouse soils, clays, peat, sewage sludge, activated sludge, bottom sediments by capillary electrophoresis using the capillary electrophoresis system "Drops"; introduction. 2010-01-01. – Moscow, 2010. – Text: direct (date of appeal: 14.12.2021);
7. HDPE F 16.1:2:2.2:2.3.74-2012. Quantitative chemical analysis of soils. Method of measuring the mass fraction of water-soluble forms of ammonium, potassium, sodium, magnesium, calcium cations in soils, soils, clay, peat, sewage sludge, bottom sediments by capillary electrophoresis using the capillary electrophoresis system "Drops"; introduction. 2012-01-01. – Moscow, 2012. – Text: direct (date of appeal: 14.12.2021);
8. GOST 26213-91. Soil. Methods for the determination of organic matter. – Instead of GOST 26213-8; introduction. 1993-07-01. – Moscow: Publishing House of Standards, 1992. – Text: electronic. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200023481 (date of application: 14.12.2021);
9. GOST 26423-85. Soil. Methods for determining the specific electrical conductivity, pH and dense residue of aqueous extract; introduction 1986-01-01. – M.: Publishing House Standartinform, 2011. – Text: electronic. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200023484 (date of application: 14.12.2021);
10. On approval of the Methodology for calculating fertility in the subject of the Russian Federation: Order of the Ministry of Agriculture of the Russian Federation No. 325 dated July 6, 2017 // GARANT. – 2017. – Aug. 4 – Text: electronic. – URL: https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71624168/ (date of application: 14.12.2021);
11. Soil science and agrochemistry. – 2010. – №1 (44). – Text: electronic. – URL: http://aw.belal.by/russian/science/soilandagro_pdf/44/44-full.pdf (date of application: 14.12.2021);
12. Dragan N.A. Comparative assessment of the quality of soil resources of the Crimea // Scientific notes of the V. I. Vernadsky Crimean Federal University. Geography. Geology. – 2011. – №2-1. pp. 260-266. – Text: electronic. – URL: https://cyberleninka.ru/article/n/sravnitelnaya-otsenka-kachestva-pochvennyh-resursov-kryma (yes-ta appeals: 14.12.2021).

УДК 543.42

# Исследование сорбционных свойств нанопорошка к ионам тяжелых металлов в динамическом и статическом режимах сорбции

Е.А. Магдыч, О.В. Ведищева, Е.М. Савенко, Т.А. Юркова
[1, 2,3,4] *ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия*
[1]*EAMacduch@sevsu.ru,* [2]*OVVedisheva@sevsu.ru,* [3]*katya.savenko.2017@mail.ru*
[4]*yurkova_2018@mail.ua*

Статья поступила 25.02.2022 г.; после доработки 28.02.2022 г_____

***Аннотация***

*Приведены результаты определения сорбционных характеристик нанопорошка кремния по отношению к модельным растворам меди (II) и никеля (II) в различных условиях сорбции: динамическом и статическом. Оценка работы нанопорошка для его дальнейшего использования в очистке сточных вод предприятий. Исследованы зависимости остаточного содержания ионов меди и никеля в растворе от времени, а также зависимость количества адсорбированного массой сорбента от времени.*

*Ключевые слова:* нанопорошки, сорбция, очистка сточных вод, ионы меди, ионы никеля, сорбенты.

# Investigation of sorption properties of nanopowder to heavy metal ions in dynamic and static sorption modes

E.A. Magdych, O.V. Vedishcheva, E.M. Savenko, T.A. Yurkova
[1, 2,3,4] *Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia*
[1]*EAMacduch@sevsu.ru,* [2]*OVVedisheva@sevsu.ru,* [3] *katya.savenko.2017@mail.ru*
[4] *yurkova_2018@mail.ua*

Статья поступила 25.02.2022 у.; после доработки 28.02.2022 у.

***Abstract***

*The results of determining the sorption characteristics of silicon nanopowder with respect to model solutions of copper (II) and nickel (II) under various sorption conditions: dynamic and static. Evaluation of the nanopowder performance for its further use in wastewater treatment of enterprises. The dependences of the residual content of copper and nickel ions in the solution on time, as well as the dependence of the amount of sorbent adsorbed by the mass on time, are investigated.*

*Keywords:* nanopowders, sorption, wastewater treatment, copper ions, nickel ions, sorbents.

## Введение

К наноматериалам условно относят дисперсные и массивные материалы, содержащие структурные элементы (зерна, кристаллиты, блоки, кластеры), геометрические размеры которых хотя бы в одном измерении не превышают 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками [3]. К нанотехнологиям можно отнести технологии, обеспечивающие возможность контролируемым образом создавать и модифицировать наноматериалы, а также осуществлять их интеграцию в полноценно функционирующие системы большего масштаба. Среди основных составляющих науки о наноматериалах и нанотехнологиях можно выделить следующие [1]: 1) фундаментальные исследования свойств материалов на наномасштабном

уровне; 2) развитие нанотехнологий как для целенаправленного создания наноматериалов, так и поиска и использования природных объектов с наноструктурными элементами, создание готовых изделий с использованием наноматериалов и интеграция наноматериалов и нанотехнологий в различные отрасли промышленности и науки; 3) развитие средств и методов исследования структуры и свойств наноматериалов, а также методов контроля и аттестации изделий и полуфабрикатов для нанотехнологий.

Для глубокой очистки сточных вод от растворенных в них веществ применяют процесс адсорбции, который протекает либо при интенсивном перемешивании адсорбента с водой, либо фильтрованием через слой адсорбента [3]. Нанопрошки за счет малых размеров частиц обладают новыми свойствами, которые можно использовать в различных технологиях и устройствах. Применение нанопорошков в качестве адсорбента позволит модернизировать существующие технологии очистки сточных вод [2].

## Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования: определение сорбционных свойств нанопорошка кремния к модельным растворам меди (II) и никеля (II) в различных условиях сорбции: динамическом и статическом, и оценка работы нанопорошка для его дальнейшего использования в очистке сточных вод предприятий.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

– исследование зависимости остаточного содержания ионов меди и никеля в растворе от времени в динамическом и статическом режимах;
– исследование зависимости количества вещества адсорбированного массой сорбента от времени в динамическом и статическом режимах.

## Методика проведения исследования

Для проведения исследования приготовленные модельные растворы солей меди и никеля с содержанием иона 0,5 мг/мл и 1 мг/мл объемом 400 мл переносили в химические стаканы.

При статическом режиме сорбции в химический стакан, заполненный раствором добавляли 0,5 г нанопорошка кремния и с периодичностью 10 минут в течение 2 часов отбирали пробы объемом 5 мл, которые анализировались на содержание иона в растворе. Концентрацию ионов меди и никеля в растворе определяли фотометрическим методом в соответствии с методиками ГОСТ.

При динамическом режиме сорбции химический стакан с аналогичным объёмом раствора и содержанием нанопорошка устанавливали на магнитную мешалку и при постоянном перемешивании отбирали аликвоты с таким же временным интервалом, как и при статических условиях.

## Результаты исследования зависимости степени сорбции от времени контакта сорбента с раствором

На рисунках 1,2 представлены зависимости остаточного содержания ионов меди и никеля в растворе от времени в динамическом и статическом режимах.

Согласно полученным данным можно отметить следующее:

1. Из представленных зависимостей на рис.1 видна положительная сорбционная способность нанопорошка в первые 10 минут и дальнейшее постоянство концентрации ионов растворе. Сорбент обладает более хорошими сорбционными свойствами к ионам никеля. Остаточное содержание никеля за весь период эксперимента не превышает 1,5% от первоначального. Для меди концентрация иона в растворе составляет 7% от первоначального. Уже к 20 минуте наблюдается процесс десорбции, т.е. сорбент отдает обратно в раствор ионы. Этот процесс более выражен для ионов меди, а для ионов никеля носит постоянный во времени характер.
2. На рис.2 сохраняется высокая сорбционная способность к двум ионам в первые 10 минут. Однако статические условия уступают динамическим по остаточному содержанию ионов в растворе. Для концентрации 1 мг/мл нанопорошок адсорбировал для никеля 87%, а меди 80%. Также сохраняется процесс десорбции.

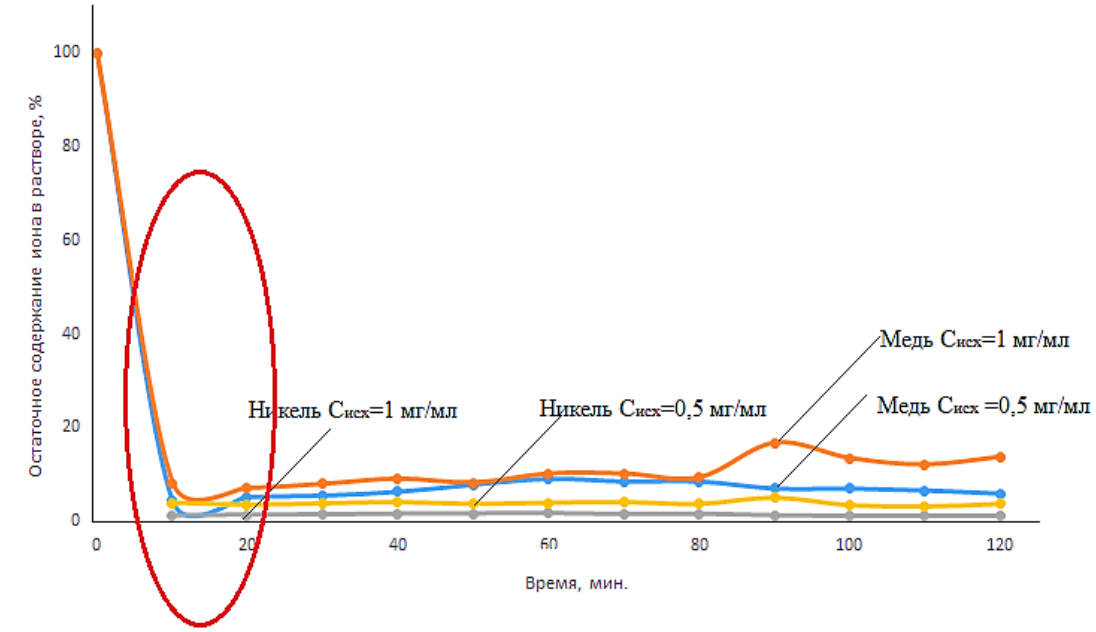



**Рис. 1.** Зависимость остаточного содержания ионов меди и никеля в растворе от времени в динамическом режиме

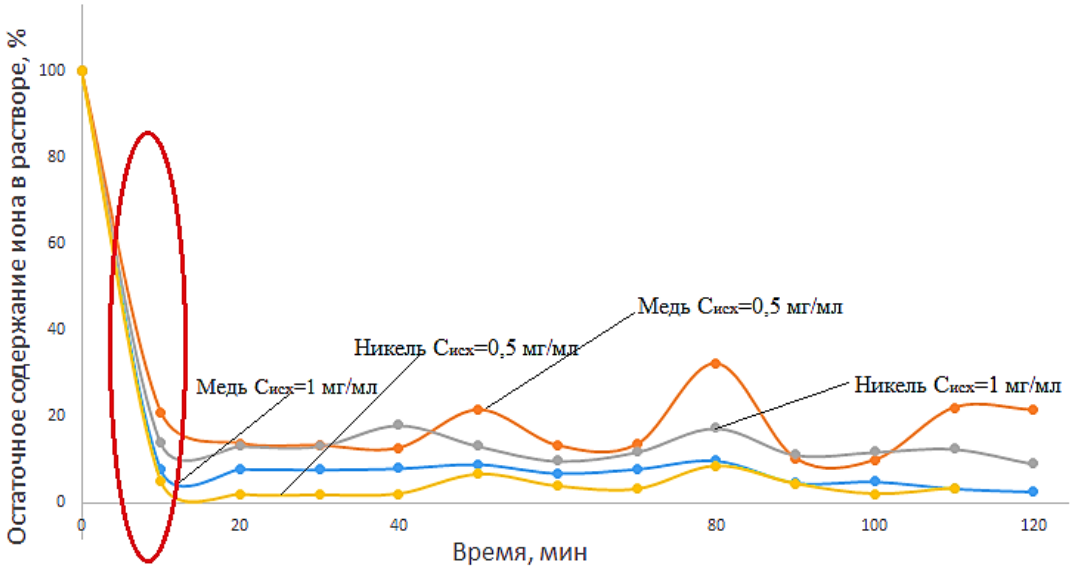



**Рис. 2.** Зависимость остаточного содержания ионов меди и никеля в растворе от времени в статическом режиме

## Результаты исследования зависимости степени сорбции от величины pH растворов

На рисунках 3,4 представлены зависимости количества вещества адсорбированного массой сорбента от времени в динамическом и статическом режимах.

Согласно полученным данным можно отметить следующее:

1. Зависимость количества вещества адсорбированного массой сорбента от времен в динамическом режиме показывает характерную работу сорбента, согласно проявленному механизму сорбции-десорбции на протяжении всего времени эксперимента.
2. Оптимальное для всех концентраций значение количества вещества, адсорбированного единицей массы сорбента, достигается на 20 минуте и при статическом и при динамическом режимах.

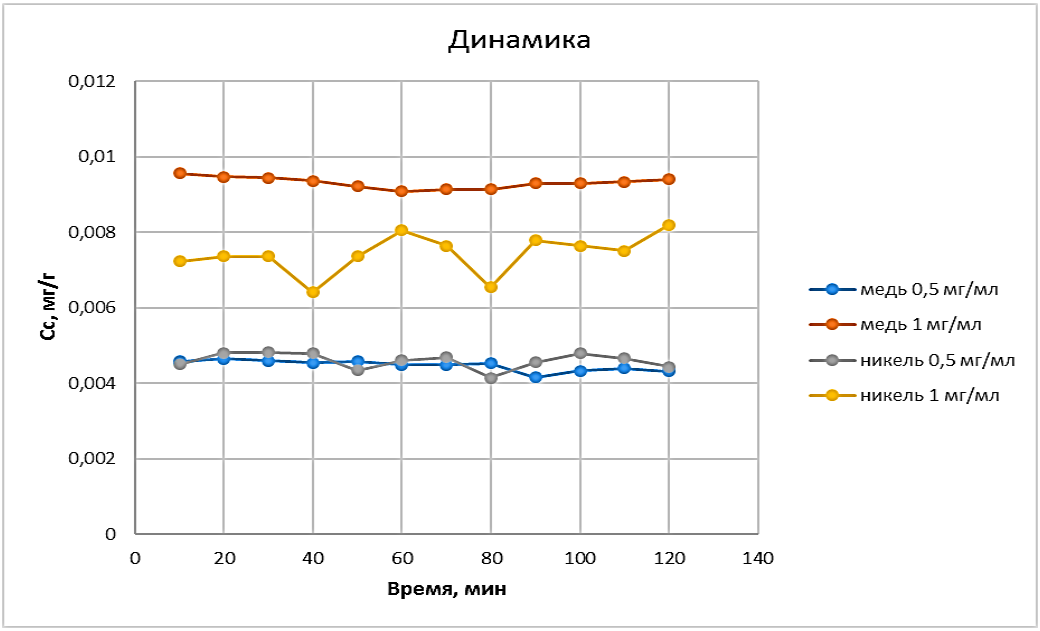



**Рис. 3.** Зависимость количества вещества адсорбированного массой сорбента от времени в динамическом режиме

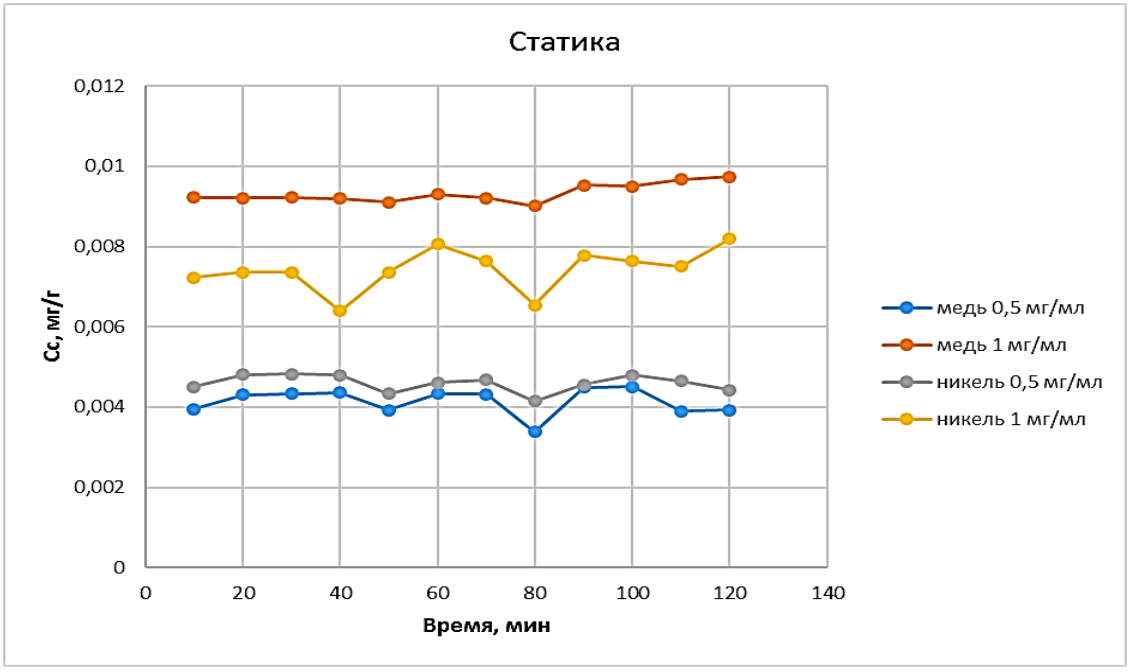



**Рис. 2.** Зависимость количества вещества адсорбированного массой сорбента от времени в статическом режиме

## Заключение

1. В результате проведенных исследований установлены основные закономерности извлечения Cu (II) и Ni (II) из водных растворов природными сорбентом в статических и динамических условиях;
2. Исследуемый материал является природным сорбентом и имеет повышенную поверхность и объем пор, что объясняет его экономическую целесообразность для применения в процессах очистки воды;
3. В серии экспериментов определены оптимальные условия для обеспечения высоких сорбционных исследуемого нанопорошка для очистки водной среды от ионов тяжелых металлов.

## Список литературы

1. Петрова Е.В., Асташкина А.П., Филоненко Д.А

и др. Исследование перспектив использования гидрофорбных волокнистых сорбентов для очистки вод от ионов металлов // Известия томского политехнического института, 2007. Т.310. №2. С136 – 140.
2. Хурамшина И.З., Никофоров А.Ф, Мигалатий Е.Ф. Модифицированные природные сорбенты для извлечения меди (II) из водных растворов //Вопросы современной науки и практики, 2015. № 1(55). С 26 – 31.
3. .Б.М. Балоян, А.Г. Колмаков, М.И. Алымов, А.М. Кротов НАНОМАТЕРИАЛЫ Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения. Москва 2007. С 3-4.

## References

1. Petrova E.V., Astashkina A.P., Filonenko D.A. et al. Study of the prospects for the use of hydrophobic fibrous sorbents for water purification from metal ions // Bulletin of the Tomsk Polytechnic Institute, 2007. V.310. No. 2. P136 - 140.
2. Khuramshina I.Z., Nikoforov A.F., Migalatiy E.F. Modified natural sorbents for the extraction of copper (II) from aqueous solutions // Issues of modern science and practice, 2015. No. 1(55). P26 - 31.
3. .B.M. Baloyan, A.G. Kolmakov, M.I. Alymov, A.M. Krotov NANOMATERIALS Classification, features of properties, application and production technologies. Moscow 2007. P 3-4.

УДК 631.452

# Анализ распределения тяжелых металлов в почвах ООО «Севастопольский»

Т.Н. Тищенко [1], Горблянская А.С.[2], Городецкая А.М.[3], Дербасова Н.М.[4], Гавриш О.П.[5]

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, hikikomori2550@gmail.com [1]*

Статья поступила 10.02.2022 г.; после доработки 14.02.2022 г.

***Аннотация***

*Проведено агрохимическое обследование почв территории сельскохозяйственный угодий ООО «Севастопольский». Проанализировано содержание Cu, Co, Zn, Mn, Pb, Cd. Составлены картограммы распределения. Результатом работы выявлено, что содержание тяжелых металлов в почве находится в пределах ПДК.*

*Ключевые слова:* почвы; плодородие; агрохимическое обследование; тяжелые металлы; рентгенфлуоресцентный анализ.

# Analysis of the distribution of heavy metals in the soils of LLC "Sevastopolsky"

T.N. Tishchenko[1], Gorblyanskaya A.S.[2], Gorodetskaya A.M [3], Derbasova N.M.[4], Gavrish O.P.[5],

*Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st,, Sevastopol, 299053, Russia, hikikomori2550@gmail.com [1]*

Received10.02.2022 y.; received in final form 14.02.2022 y.

***Abstract***

*An agrochemical survey of the soils of the territory of the agricultural lands of LLC "Sevastopolsky" was carried out. The content of Cu, Co, Zn, Mn, Pb, Cd is analyzed. Distribution cartograms are compiled. The results of the work revealed that the content of heavy metals in the soil is within the MPC.*

*Key words:* soils; fertility; agrochemical survey; heavy metals; X-ray fluorescence analysis.

## Введение

В последние годы к разрушающим воздействиям на почвенный покров эрозии, переуплотнения, засоления добавился новый мощный фактор деградации плодородия – техногенное загрязнение почв тяжелыми металлами: марганцем, хромом, свинцом, цинком, медью, никелем, кобальтом, кадмием.

Тяжелые металлы оказывают воздействие на микрофлору почв, тем самым нарушая процессы минерализации органических остатков, обеспечивающих сопряжение биологического и геологического круговоротов [1,4].

При загрязнении почв тяжелыми металлами ухудшается фосфатный режим в связи с образованием труднорастворимых осадков фосфатов, а также азотный режим вследствие ингибирования микроорганизмов; ослабляется гумусонакопление в связи с меньшим поступлением растительных остатков в почву, происходит ингибирование микробиологической активности. Все вышеизложенное определяет необходимость дополнительных затрат на окультуривание почв [2,3]

Именно этим обусловлена необходимость

проведения крупномасштабного агрохимического обследования почв, включающего оценку агрохимического состояния почв и определение влияния содержания тяжелых металлов в почвах на показатель плодородия.

В работе проведено агрохимическое обследование для почв территории ООО «Севастопольский». Выбран участок проведения работ, расположенный на территории поселка Сахарная Головка. Поселок находится в северо-западной части района, на правом берегу реки Черной, в 24 км от центра Севастополя, соседние населенный пункты: Штурмовое – в 1 км на юге, Октябрьский – в 2 км западнее и Инкерман – в 3 км на северо-запад.

Цель работы: осуществление контроля и оценка уровня загрязнения почв исследуемого участка тяжелыми металлами; составление агрохимических картограмм, необходимых для правильного применения удобрений, возможного планирования урожайности, размещение севооборотов, а также проведения химических мелиораций по возможностям хозяйства.

## Порядок выполнения обследования

*1. Исследование участка отбора проб.*

Площадь участка, на котором осуществлялся контроль содержания тяжелых металлов в почве составил 52 тыс. м$^2$, была условно разделена на 15 элементарных участков. Размер элементарных участков для отбора проб определялся особенностями рельефа [5].

*2. Выбор маршрута отбора точечных проб.*

Выбор маршрута при агрохимическом обследовании в значительной степени определяется конфигурацией поля. Маршрут, определенный для проведения обследования, отображён на рисунке 1 [5].




**Рис.1** Карта-схема отбора проб (образцов) на элементарном почвенном участке ООО «Севастопольский»

*3. Отбор смешанного (объединенного) образца почвы.*

Объединённая проба составлялась из многих точечных проб (индивидуальных образцов), отобранных равномерно со всей площади элементарного участка поля. Таким образом, было отобрано 15 образцов почвы с горизонта 0–30 см, массой 0,45 г каждая. Каждый смешанный образец был упакован в матерчатые мешки и промаркирован с указанием номера поля и образца, времени взятия пробы [5].

*4. Пробоподготовка почвенных образцов для анализа.*

Почвенные образцы при подготовке к анализу доводились до воздушно-сухого состояния в сушильном шкафу при температуре 40–45°С и усреднялись просеиванием через сито с отверстиями диметром 0,25 мм [5].

*5. Проведение анализа проб почвы.*

Определение массовой доли тяжелых металлов осуществлялось рентгенфлуоресцентным методом на СПЕКТРОСКАН МАКС-JWM в соответствии с «Методикой измерений массовой доли металлов и оксидов в порошковых пробах почв рентгенфлуоресцентным методом» [6].

*7. Анализ результатов.*

Оценка степени загрязнения почв тяжелыми металлами выполнялась путем сопоставления фактических значений концентраций с ПДК [7].

*8. Составление картограмм.*

На основании полученных данных, при помощи программного обеспечения QGIS были составлены картограммы распределения анализируемых элементов на исследуемом почвенном участке ООО «Севастопольский». Непрерывные значения концентраций металлов в выбранных точках отбора проб преобразовали в контуры, представляющие собой векторные площадные объекты.

## Результата агрохимического обследования

В ходе проведения агрохимического обследования почвенного участка территории сельскохозяйственных угодий ООО «Севастопольский» получены данные, представленные в таблице 1.

Из представленных данных видно, что содержание тяжелых металлов в почве находится в пределах ПДК, что свидетельствует о не превышении уровня контроля содержания тяжелых металлов в почвах.

***Таблица 1.*** *Результаты анализа обследования почвенного участка территории ООО «Севастопольский»*

| №образца | Cu | Co | Zn | Mn | Pb | Cd |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 64264832 | 0,44 | 1,34 | 4,70 | 107,42 | 2,27 | 0,15 |
| 64264833 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264834 | 0,53 | 0,80 | 5,61 | 75,94 | 5,39 | 0,15 |
| 64264835 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264836 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264837 | 0,45 | 0,93 | 2,31 | 106,25 | 1,05 | 0,19 |
| 64264838 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264839 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264840 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264841 | 0,48 | 1,23 | 2,72 | 81,28 | 2,58 | 0,11 |
| 64264842 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264843 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264844 | 0,68 | 0,53 | 9,32 | 106,71 | 0,88 | 0,26 |
| 64264845 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| 64264846 | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о | н/о |
| **ПДК** | **3,0** | **5,0** | **23,0** | **140,0** | **6,0** | **0,7** |

## Составление картограмм распределения тяжелых металлов на исследуемом участке

Для наглядного отображения распределения анализируемых элементов, с учетом их концентраций, при помощи программного обеспечения QGIS были составлены картограммы распределения анализируемых элементов на исследуемом почвенном участке ООО «Севастопольский» (рис 2-7).

Разработанные картограммы позволяют оценить степень полиэлементного загрязнения, и выделить геохимические аномалии на исследуемых участках. Использование картограмм при осуществлении мероприятий по повышению плодородия почв позволит более точно скорректировать объемы необходимых культивационных работ. Другими словами, такие карты помогут с высокой точностью определить не только необходимость внесения в почву удобрений, но и подробно рассчитать минеральную и органическую составную вносимых удобрений и их pH, в зависимости от величины показателей в определенных точках почвенного участка.

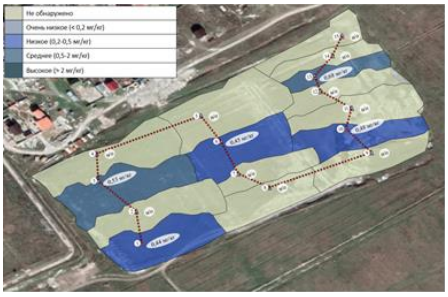


**Рис. 2** Картограмма распределения Cu (мг/кг) на исследуемом участке ООО «Севастопольский»



**Рис. 3**. Картограмма распределения Pb (мг/кг) на исследуемом участке ООО «Севастопольский»



**Рис. 4.** Картограмма распределения Co (мг/кг) на исследуемом участке ООО «Севастопольский»

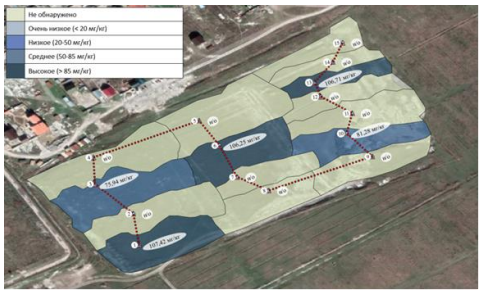


**Рис. 5.** Картограмма распределения Mn(мг/кг) на исследуемом участке ООО «Севастопольский»

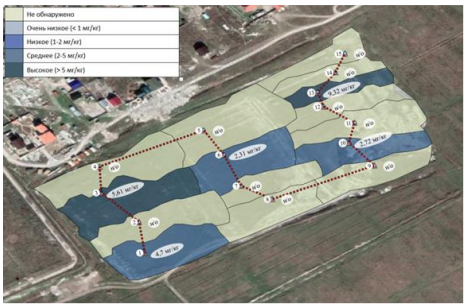



**Рис.6.** Картограмма распределения Zn (мг/кг) на исследуемом участке ООО «Севастопольский»

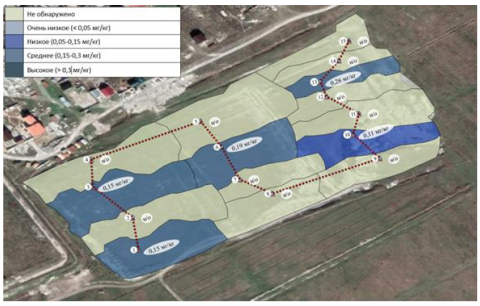



**Рис. 7.** Картограмма распределения Cd (мг/кг) на исследуемом участке ООО «Севастопольский»

## Вывод

По результатам агрохимического обследования почв было установлено, что превышений по содержанию тяжелых металлов почвах сельскохозяйственных угодий территории ООО «Севастопольский» выявлено не было. На основании полученных данных были составлены картограммы распределения тяжелых металлов на исследуемом участке, которые позволяют оценить состояние площадных земельных, а также помогут скорректировать объемы работы при осуществлении работ, направленных на повышение плодородия почв исследуемого участка.

## Список литературы

1. Селюкова С. В. ТЯЖЕЛЫЕ МЕТАЛЛЫ В АГРОЦЕНОЗАХ // Достижения науки и техники АПК. 2020. №8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-v-agrotsenozah (дата обращения: 14.12.2021).
2. Гукалов В.Н., Савич В.И., Трифонова Н.А. Поэтапное изменение свойств почв при загрязнении их тяжелыми металлами // Плодородие. 2015. №1 (82). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poetapnoe-izmenenie-svoystv-pochv-pri-zagryaznenii-ih-tyazhelymi-metallami (дата обращения: 14.12.2021).
3. Аристархов Алексей, Лунев Михаил, Павлихина Александра Эколого-агрохимическая оценка состояния пахотных почв России по содержанию в них подвижных форм тяжелых металлов // МСХ. 2016. №6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-agrohimicheskaya-otsenka-sostoyaniya-pahotnyh-pochv-rossii-po-soderzhaniyu-v-nih-podvizhnyh-form-tyazhelyh-metallov (дата обращения: 14.12.2021).
4. Сюняева О. И., Окунева О. А., Леонова Ю. В. Региональный мониторинг параметров плодородия почв земель сельскохозяйственного назначения // Земледелие. 2021. №6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/regionalnyy-monitoring-parametrov-plodorodiya-pochv-zemel-selskohozyaystvennogo-naznacheniya (дата обращения: 14.12.2021).
5. ГОСТ Р 58595-2019. Почвы. Отбор проб; введ. 2020-01-01 – М.: Изд-во Стандартинформ, 2019. – Текст: электронный. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200168814 (дата обращения: 14.12.2021)
6. ГОСТ 33850-2016 Почвы. Определение химического состава методом рентгенофлуоресцентной спектрометрии; введ. 2017-07-01 – М.: Изд-во Стандартинформ,2016. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200140375 (дата обращения: 14.12.2021)
7. Санитарные правила и нормы: СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания; введ. 2021-03-01. – URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (дата обращения: 14.12.2021г.)

## References

1. Selyukova S. V. HEAVY METALS IN AGROCENOSES // Achievements of science and technology of agroindustrial complex. 2020. No. 8. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-v-agrotsenozah (date of application: 14.12.2021).
2. Gukalov V.N., Savich V.I., Trifonova N.A. Step-by-step change of soil properties when polluted with heavy metals // Fertility. 2015. No. 1 (82). URL: https://cyberleninka.ru/article/n/poetapnoe-izmenenie-svoystv-pochv-pri-zagryaznenii-ih-tyazhelymi-metallami (date of application: 14.12.2021).
3. Aristarkhov Alexey, Lunev Mikhail, Pavlikhina Alexandra Ecological and agrochemical assessment of the state of arable soils in Russia by the content of mobile forms of heavy metals in them // Ministry of Agriculture. 2016. No. 6. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/ekologo-agrohimicheskaya-otsenka-sostoyaniya-pahotnyh-pochv-rossii-po-soderzhaniyu-v-nih-podvizhnyh-form-tyazhelyh-metallov (date of application: 14.12.2021).
4. Syunyaeva O. I., Okuneva O. A., Leonova Yu. V. Regional monitoring of soil fertility parameters of

agricultural lands. 2021. No.6. URL: https://cyber-leninka.ru/article/n/regionalnyy-monitoring-parametrov-plodorodiya-pochv-zemel-selsko-hozyaystvennogo-naznacheniya (date of application: 14.12.2021).
5. GOST R 58595-2019. Soil. Sampling; introduction. 2020-01-01 - Moscow: Standardinform Publishing House, 2019. - Text: electronic. - URL: https://docs.cntd.ru/document/1200168814 (date of application: 14.12.2021)
6. GOST 33850-2016 Soils. Determination of chemical composition by X-ray fluorescence spectrometry; introduction. 2017-07-01 - Moscow: Standardinform Publishing House, 2016. - URL: https://docs.cntd.ru/document/1200140375 (date of application: 14.12.2021)
7. Sanitary rules and regulations: SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans; introduction. 2021-03-01. - URL: https://docs.cntd.ru/document/573500115 (date of notification: 14.12.2021)

**ISSN 2413-5526**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ**
**«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»**
**Том 8 № 1**

**SCIENTIFIC MAGAZINE**
**«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»**
**Vol. 8 No 1**

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

Адрес редколлегии:
ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова.*

Подписано к печати 14.03.2022. Изд. № 2/22. Зак. 9/22. Тираж 65 экз.
Объем 21,5 п.л. Усл. печ. л. 19,99. Уч.-изд. л. 21,07. Формат бумаги 60 х 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»