

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. 7 № 2

**Севастополь
2021**

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2021. – Т. 7. - № 2. – 200 с.: ил.

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

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

Редакционная коллегия:

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;
Тимошенко 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;
Магдых 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.

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	7
<i>Исаев А.В., Матузаев К.Б.</i> Некоторые способы защиты ядерного реактора от интенсивных динамических воздействий	7
<i>Исаев А.В., Матузаев К.Б.</i> О последствиях взрыва в негерметичном отсеке судна	12
<i>Тимофеев А.Д., Шаповаленко В.В.</i> Использование в конструкции тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР перемешивающих решеток и их влияние на гидродинамические процессы в активной зоне реактора	19
Автоматизация процессов контроля и управления	22
<i>Кузнецова Н.И., Зимин Ю.А., Нурзай В.А.</i> Анализ состояния системы контроля и управления на базе платформы ТПТС-НТ на основе информации по самодиагностике	22
<i>Кузнецова Н.И., Матюшенко А.С., Серова-Нашева Н.В.</i> Анализ эксплуатационной надежности систем контроля и управления на базе платформы ТПТС-НТ	29
<i>Кузнецова Н.И., Мельник Д.А., Нурзай В.А.</i> Анализ и оценка работоспособности основных элементов при диагностировании СКУ АЭС	38
Электротехнические комплексы и системы	44
<i>Кочетов И.А., Омельченко Н.В.</i> Область применения MOSFET, IGBT, SiC, GaN	44
<i>Лыжин А.И., Кочетов И.А.</i> Перспектива применения МОКС-топлива в атомной энергетике	50
<i>Пронина А.К., Путилин К.П.</i> Совершенствование защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35кВ	55
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	62
<i>Власов Н.А., Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Сперанский М.Ю., Лавренчук А.А.</i> Возможности увеличения выходных характеристик фотоэлектрических преобразователей в зависимости от оптической прозрачности защитных покрытий	62
<i>Жиганов И.Г., Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Сперанский М.Ю., Лавренчук А.А.</i> Некоторые результаты исследования характеристик тепловой гелиоустановки с фотоэлектрическим источником питания	67
<i>Ивантеев И.С., Шайтор Н.М., Кувишинов В.В., Олейников А.М., Нашев Р.А.</i> Использование возобновляемых источников для обеспечения энергетических систем припортовых сооружений г. Севастополя	73
<i>Котельников Д.Ю., Кузнецов П.Н.</i> Использование беспилотных летательных для мониторинга и диагностики солнечных электростанций	80
<i>Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Соломенникова С.И., Стаценко А.К.</i> Модель использования возобновляемой энергетики в курортно-рекреационной системе Республики Крым	87
<i>Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Тиман Д.И., Жиганов И.В., Стаценко А.К.</i> Использование тепловой геотермальной энергии для обеспечения коммунальных потребителей в г. Севастополь	92
<i>Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Нашев Р.А., Бордан Д.Ф., Тиман Д.И.</i> Использование ветровых и солнечных установок для обеспечения автономного жилого дома	97
<i>Шайтор Н.М., Яковенко Н.А.</i> Аналитический обзор интеллектуальной системы управления электрическими сетями России	106
<i>Шайтор Н.М., Велияев А.С.</i> Расчет и анализ температурных полей асинхронных двигателей	112

<i>Шайтор Н.М., Санников К.К. Обзор современных отечественных систем возбуждения АО "Силовые машины"</i>	119
Моделирование физических процессов	124
<i>Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Глушкова Е.В., Дюдяев И.А., Майорова В.В. Определение коэффициента трения скольжения методом гармонических колебаний</i>	124
<i>Ожиганова М.И., Егорова А.О., Миронов А.О., Головин А.А. Автоматизация выбора мер по обеспечению безопасности объекта КИИ соответствующей категории значимости при составлении модели угроз</i>	130
<i>Широков И.Б., Евдокимов П.А., Широкова Е.И. Контроль влажности угольных пород при помощи радиоволн</i>	136
Химические технологии	144
<i>Акимов А.М., Котельникова С.А., Слизченко Е.В. Исследование электрохимического метода коагуляции природной воды</i>	144
<i>Акимов А.М., Котельникова С.А. Исследование пылезакрепляющих растворов при транспортировании горных масс</i>	148
<i>Акимов А.М., Котельникова С.А., Слизченко Е.В. Исследование процесса очистки воды от кремния с помощью коагуляции</i>	152
<i>Замыслова Т.Н., Магдыч Е.А., Волкова В.П. Оценка возможности применения природных сорбентов в качестве буферного материала в пунктах глубинного захоронения РАО</i>	156
<i>Федорова С.А., Магдыч Е.А. Анализ структур математических моделей исследования сорбционных свойств термически модифицированных сорбентов кварца, цеолита и шунгита при сорбции Cu^{2+}</i>	163
Экологическая безопасность	169
<i>Заблоцкая Е.В., Кучерик Г.В., Дербасова Н.М., Тищенко Т.Н., Горблян-ская А.С. Оценка токсичности воды Кадыковского карьера</i>	169
<i>Медведева К.А., Дербасова Н.М., Шагова Ю.О., Гавриш О.П. Диоксид кремния для очистки сточных вод от свинца</i>	177
<i>Нарбекова Д.Д., Дербасова Н.М., Гавриш В.М., Кондакова А.А. Очистка сточных вод, содержащих органические примеси с помощью нанопорошка оксида вольфрама</i>	182
<i>Омельчук Ю.А., Кучерик Г.В., Заблоцкая Е.В., Флёрко О.В. Оценка эффективности ингибиторов отложений осадков с учетом коэффициента упаривания воды</i>	186
<i>Цымбал И.М., Кучерик Г.В. Исследование трансформации органического вещества, выделенного из листового опада</i>	194

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	7
<i>Isaev A.V., Matuzaev K.B.</i> Some methods to protect a nuclear reactor from intense dynamic influences	7
<i>Isaev A.V., Matuzaev K.B.</i> On the consequences of an explosion in a leaky compartment of a ship	12
<i>Timofeev A.D., Shapovalenko V.V.</i> Use in the design of the fuel assembly of the reactor VVE stirring grilles and their effect on hydrodynamic processes in the active zone of the reactor	19
Process automation and control	22
<i>Kuznetsova N.I., Zimin J.A., Nurzai V.A.</i> Analysis of the state of control and management system based on TPTS-NT platform by the information of self-diagnosis	22
<i>Kuznetsova N.I., Matyushenko A.S., Serova-Nasheva N.V.</i> Analysis of operational reliability of monitoring and control systems based on TPTS-NT platform	29
<i>Kuznetsova N.I., Melnik D.A., Nurzai V.A.</i> Analysis and evaluation of the working capacity of the main elements during NPP's CMS diagnosing	38
Electrotechnical complexes and systems	44
<i>Kochetov I.A., Omel'chenko N.V.</i> Scope of MOSFET, IGBT, SiC, GaN	44
<i>Lyzhin A.I., Kochetov I.A.</i> The prospect of using MOX fuel in the nuclear power industry	50
<i>Pronina A.K., Putilin K.P.</i> Improvement of protection against single-phase earth faults in 6-35kv networks	55
Alternative and renewable energy sources	62
<i>Vlasov N.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Speranskiy M.Yu., Lavrenchuk A.A.</i> Possibilities of increasing the output characteristics of photoelectric con-verters depending on the optical transparency of protective coatings	62
<i>Zhiganov I.G., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Speranskiy M.Yu., Lavrenchuk A.A.</i> Some results of the study of the characteristics of a thermal solar plant with a photovoltaic power source	67
<i>Ivantyeyev I.S., Shaytor N.M., Kuvshinov V.V., Oleynikov A.M., Nashev A.R.</i> The use of renewable sources for the provision of energy systems of port facilities in Sevastopol	73
<i>Kotelnikov D.Y., Kuznetsov P.N.</i> Use of unmanned aerial vehicles for monitoring and diagnostics of solar power plants	80
<i>Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Solomennikova S.I., Statsenko A.K.</i> Model of renewable energy use in the resort and recreational system of the Republic of Crimea	87
<i>Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Timan D.I., Zhiganov I.V., Statsenko A.K.</i> The use of thermal geothermal energy to provide municipal consumers in Sevastopol	92
<i>Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Nashev R.A., Bordan D.F., Timan D.I.</i> The use of wind and solar installations to provide an autonomous resi-dential building	97
<i>Shaytor N.M., Iakovenko N.A.</i> Analytical overview of the intelligent electric grid management system of Russia	106
<i>Shaytor N.M., Velilyaev A.S.</i> Calculation and analysis of temperature fields of asynchronous motors	112
<i>Shaytor N.M., Sannikov K.K.</i> Overview of modern domestic excitation systems JSC "Power machines"	119

Modeling of physical processes	124
<i>Korneeva, N.K., Pichugova, L.N., Glushkova E.V., Dyudyaev I.A., Mayorova V.V.</i> Determination of the sliding friction coefficient by the harmonic oscillation method	124
<i>Ozhiganova M.I., Egorova A.O., Mironova A.O., Golovin A.A.</i> Automation of the selection of measures to ensure the safety of the KII facility of the significance category in modeling the threat	130
<i>Shirokov I.B., Evdokimov P.A., Shirokova E.I.</i> Monitoring the moisture content of coal rocks using radio waves	136
Chemical technology of nuclear power plants	144
<i>Akimov A.M., Kotelnikova S.A., Slizchenko E.V.</i> Investigation of the electrochemical method of natural water coagulation	144
<i>A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova</i> Investigation of dust-retaining solutions during transportation of rock masses	148
<i>Akimov A.M., Kotelnikova S.A., Slizchenko E.V.</i> Investigation of the process of water purification from silicon by coagulation	152
<i>Zamislova T.N., Magdych E.A., Volkova V.P.</i> Assessment of the possibility of using natural sorbents as a buffer material in deep disposal sites for RW (DDSRW)	156
<i>Fedorova S.A., Magdych E.A.</i> Analysis of the structures of mathematical models for studying the sorption properties of thermally modified sorbents of quartz, zeolite and shungite during the sorption of Cu ²⁺	168
Environmental Safety	169
<i>Zablozkaya E.V., Kucherik G.V., Derbasova N.M., Tischenko T.N., Gorblyanskaya A.S.</i> Assessment of the toxicity of water in the Kadykovsky quarry	169
<i>Medvedeva K.A., Derbasova N.M., Shagova Yu.O., Gavrish O.P.</i> Silicon dioxide for wastewater treatment from lead	177
<i>Narbekova D.D., Derbasova N.M., Gavrish V.M., Kondakova A.A.</i> Treatment of wastewater containing organic impurities with tungsten oxide nanopowder	182
<i>Omelchuk Yu.A., Kucherik G.V., Zablotskaya E.V., Flyorko O.V.</i> Evaluation of the effectiveness of sediment inhibitors taking into account the coefficient of water evaporation	186
<i>Tsymbol I.M., Kucherik G.V.</i> Research on the transformation of organic matter, isolated from leaf litter	194

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.5:699.841:624.042.8

Некоторые способы защиты ядерного реактора от интенсивных динамических воздействий

А.В. Исаев¹, К.Б. Матузаев²

¹ФГБВОУ ВО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова»
Дыбенко Павла, 1А, г. Севастополь, 299028, Россия, alexey9588@yandex.ru

²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, k.b.matuzayev@sevsu.ru

Статья поступила 26.04.2021 г.; после доработки 28.04.2021 г.

Аннотация

В порядке обсуждения рассматриваются нетрадиционные (не основанные исключительно на повышении прочности корпуса) пути эффективной защиты ядерного реактора от динамических воздействий большой интенсивности (взрывов, землетрясений).

Ключевые слова: ядерный реактор, динамические воздействия, сейсмическая изоляция, упругопластическое демпфирование

Some methods to protect a nuclear reactor from intense dynamic influences

A.V. Isaev¹, K.B. Matuzayev²

¹Black Sea Higher Naval College named after P.S. Nakhimova, 1A Dybenko Pavla st., Sevastopol, 299028, Russia,
alexey9588@yandex.ru

²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, k.b.matuzayev@sevsu.ru

Received 26.04.2021 y.; received in final form 28.04.2021 y.

Abstract

As a discussion, non-traditional (not based solely on increasing the strength of the vessel) ways of effectively protecting a nuclear reactor from dynamic effects of high intensity (explosions, earthquakes) are considered.

Keywords: nuclear reactor, dynamic effects, seismic isolation, elastoplastic damping

Введение

Строительство АЭС невозможно без тщательного исследования сейсмической обстановки в регионе расположения будущей станции. Ученые рассчитывают вероятность землетрясения максимум в 8 баллов, при этом выбирают участок, где сила возможного катаклизма наименьшая: на 1 – 2 балла ниже средней по региону. Вероятность крупного землетрясения не должна превышать показатель 1 раз в 10 тысяч

лет. Для этого в расчет включают статистику региона и геологические условия площадки.

На основании прогноза специалисты рассчитывают параметры строительных конструкций, трубопроводов и оборудования. При необходимости оборудование оснащается гидроамортизаторами. В настоящее время все российские АЭС находятся в зонах низкой сейсмоопасности. В европейской части нашей страны на Восточно-Европейской плите, где расположено большинство станций, землетрясения – редкость: если

они случаются, то с небольшой интенсивностью. Мощные природные катаклизмы в местах, где расположены российские АЭС, попросту невозможны, считают в [1].

Крымско-Черноморский регион относится к числу сейсмоактивных и сейсмоопасных. В базе данных по Крыму упоминается около 3000 землетрясений, 40 из которых были весьма разрушительны. Сейсмологи утверждают, что между крымскими землетрясениями проходит 80–100 лет. Если это действительно так – мы вступили в опасный период: в последний раз Крым пострадал от разрушительного землетрясения в 1927 году.

В [2] приводятся только самые мощные землетрясения, которые превысили порог в 7 баллов и таковых оказалось достаточно. Самое первое, зафиксированное учеными, землетрясение в Крыму случилось в 150 году до н.э. Судя по одинаковым завалам стен в группе дольменов (это древние погребальные и культовые сооружения, относящиеся к категории мегалитов) оно превысило 7 баллов.

В октябре 63 год до н.э. Пантикапейское землетрясение достигло 8 баллов и разрушило местные города. В летописях указывается, что оно произошло в «то время, как Митридат справлял на Боспоре праздник Цереры». В сентябре 480 года произошло землетрясение силой 8 баллов. В Херсонесе разрушены стены. Толчки отмечались во многих частях Византийской империи, частью которой был Херсонес.

В 1341 году в районе Евпатории произошло землетрясение силой 8 баллов, сопровождавшееся цунами. Один византийский историк отмечает, что цунами затопило побережье вглубь до 10 верст (10–11 км). 9 сентября 1471 года в Ялте население в панике покинуло город после толчков силой 8 баллов. Ученые считают, что эпицентр землетрясения находился в Карпатах. 5 июня 1615 года произошло землетрясение силой 8 баллов. В Феодосии разрушены городские стены, на побережье обрушились сильные цунами.

11 октября 1869 года в Судакe амплитуда землетрясения достигала 7 баллов, отмечалось слабое цунами. Население было обьято страшной паникой, указывают свидетельства очевидцев. Колебания земли привели даже к разрушению весьма сейсмостойких генуэзских строений. 25 декабря 1919 года эпицентр землетрясения (7 баллов) находился на восточном побережье Крыма. Очевидцы говорят о большой разрушительной силе толчков, сопровождавшихся

необычайной силы штормом, что привело к разрушению Ялтинского порта и линий телеграфной связи. 1 марта 1923 года в Судакe землетрясение достигало 7 баллов.

1927 год – это один из самых сейсмоопасных периодов за все время наблюдений. Первые толчки произошли 26 июня мощностью 7 баллов. Как свидетельствуют очевидцы, после этих толчков «весь транспорт из Крыма был переполнен испуганными туристами, которые сразу же сорвались с места и возвращались домой». 29 июня – афтершок – 5 баллов, 1 августа новый толчок силой 4 балла. 11 сентября появились первые признаки нового землетрясения: животные заметно беспокоились и отказывались от корма, «беспрерывно мычали коровы, собаки и кошки жались к своим хозяевам». Последующее за этим землетрясение вызвало настоящую катастрофу – 9 балльные колебания привели к огромным разрушениям и человеческим жертвам. В течение следующих нескольких дней было зарегистрировано более 200 толчков. Фактически было разрушено все побережье от Алушты до Севастополя. В районе Ялты пострадало 70 % построек.

18 марта 1957 года произошло Севастопольское землетрясение силой до 7 баллов, а 8 января 1969 года в Крыму также отмечалось землетрясение силой 7 баллов.

В Японии [3], например, большое внимание уделяется надежной защите АЭС (зданий, реакторов, коммуникаций) от сейсмических воздействий. С этой целью создан уникальный испытательный вибрационный стенд для имитации землетрясений (размер стенда – 15×15×17 метров), который воспроизводит интенсивное сейсмическое воздействие на испытываемый объект.

Если рассматривать объект как абсолютно твердое тело (в данном случае – реактор), жестко связанное с основанием, т.е. при отсутствии защиты от воздействия, то ускорение основания (от взрыва либо землетрясения) и ускорение объекта будут совпадать по модулю и направлению. Теории и практике защиты объектов техники от вибрационных и ударных воздействий большой интенсивности посвящена обширная литература [4–9], но при экстремальных динамических воздействиях известные классические методы виброизоляции и защиты не всегда эффективны.

Постановка задачи

В данной статье необходимо проанализиро-

вать возможность использования для защиты реактора от интенсивных динамических воздействий кинематического фундамента с гравитационной сейсмоизоляцией, а также повышенного упругопластического деформирования дополнительных связей, соединяющих корпус реактора с фундаментом.

Использование гравитационной системы сейсмоизоляции на сфероидах

Гравитационная система сейсмоизоляции на эллипсоидах вращения, разработанная и внедренная на практике выдающимся ученым и инженером В.В. Назиным (г. Севастополь), позволяет существенно снизить сейсмическую нагрузку на защищаемый объект за счет увеличения периода свободных колебаний объекта с системой сейсмоизоляции [5]. Например, если максимальное значение силы инерции при свободных колебаниях объекта $|\Phi^{ин}| = m\omega^2 A$, где m – масса объекта, ω – частота, A – амплитуда колебаний, то с уменьшением ω существенно снижается инерционная нагрузка. Схема реактора с гравитационной системой защиты от колебаний основания изображена на рис. 1.

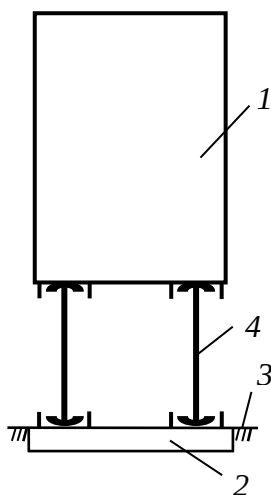


Рис. 1. Ядерный реактор с системой защиты от колебаний основания: 1 – реактор; 2 – фундаментная плита; 3 – основание; 4 – стойки с эллипсоидальными концами.

Как показали теоретические, лабораторные и натурные экспериментальные исследования, система сейсмоизоляции с низкой собственной частотой и гравитационной восстанавливающей силой обеспечивает сейсмоизоляцию зданий в широком диапазоне типичных землетрясений,

для которых известны реальные акселерограммы.

На основании обобщения опыта проектирования и строительства восьмиэтажных зданий с системой сейсмоизоляции в г. Севастополе можно предложить использовать данное техническое решение для защиты ядерного реактора.

Использование упругопластического демпфирования

Один из вариантов технического решения защиты реактора с использованием пластического демпфирования упругих и упругопластических связей изображена на рис. 2. Известно ряд исследований динамики объектов с использованием физически нелинейных элементов при сейсмических воздействиях [6 – 8], внедрение таких технических решений для защиты ядерного реактора требует дальнейших исследований.

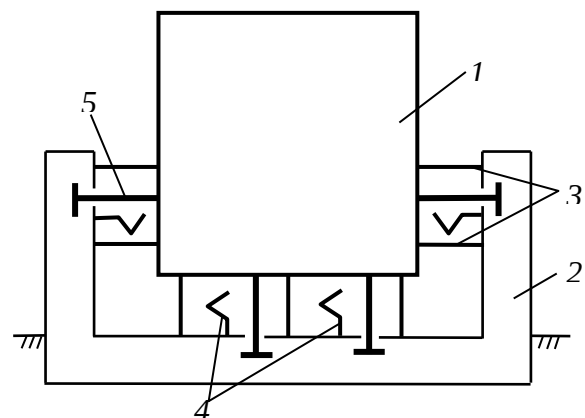


Рис. 2. Реактор с выключающимися и включающимися упругопластическими связями: 1 – реактор; 2 – железобетонный стакан; 3 – выключающиеся связи; 4 – включающиеся упругопластические связи; 5 – включающиеся связи-ограничители.

Связи 3 представляют собой упругие стержни с шарнирным закреплением концов. Стержни теряют устойчивость (выпучиваются) при значении продольной силы $P_{кр} = \pi^2 EI_{min} / \ell^2$, где E – модуль упругости материала; I_{min} – минимальное значение осевого момента инерции поперечного сечения стержня; ℓ – длина стержня. Выключение связей

3 при критической продольной силе обеспечивает уклонение объекта от воздействия.

Упругопластические связи 4 включаются в работу при заданном пороге перемещения объекта и интенсивно рассеивают кинетическую энергию объекта.

Связи-ограничители 5 также включаются в работу при заданном пороге перемещения объекта и должны ограничить его свободное перемещение. Эти связи могут быть как упругопластические, так и жесткопластические.

На рис. 2 не показаны другие возможные типы разрушающихся связей, которые приводят к скачкообразному изменению жесткости системы и способствуют отстройке от резонанса при сложных динамических воздействиях на объект.

На рис. 3. изображена диаграмма деформирования типа «перемещение – восстанавливающая сила» для объекта с предложенной системой связей. Например, при большом импульсном воздействии происходит внезапное разрушение (или выключение) связи в точке 1, а затем при перемещении объекта на Δ_3 включается упругопластическая связь, которая в свою очередь при достижении перемещения Δ_5 переходит в стадию упругой работы. Численный анализ такого динамического поведения объекта выполнен в [9].

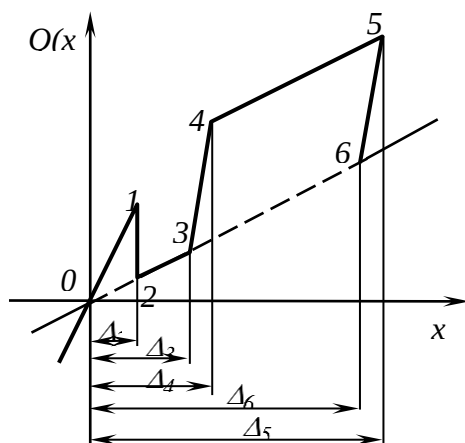


Рис. 3. График нелинейной зависимости восстанавливающей силы, создаваемой связями, от перемещения объекта: Δ_2 – перемещение в момент отключения (или разрушения) связи; Δ_3 – перемещение в момент включения дополнительной упругопластической связи; Δ_4 – начало пластического деформирования связи; Δ_5 – начало упругой разгрузки упруго-

пластической связи; Δ_6 – отключение упругопластической связи.

Рассмотренная комбинация системы связей приводит к существенному снижению ускорения объекта и является эффективной защитой реактора от динамических воздействий.

Заключение

Анализ динамики объектов с гравитационной системой сейсмоизоляции показывает, что в перспективе не исключается их использование для дополнительной защиты ядерных реакторов от сейсмических воздействий.

Повышение безопасности эксплуатации ядерных реакторов в сейсмически опасных районах может быть обеспечено за счет использования многоуровневой защиты, которая в том числе включает повышенное пластическое демпфирование специальных связей, обеспечивающее диссипацию энергии воздействия и снижение динамической нагрузки.

Мы благодарим А.И. Бохонского за его консультации в процессе написания работы.

Список литературы

1. Как устроена система безопасности АЭС. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/kak-ustroena-sistema-bezopasnosti-aes.html> (дата обращения: 12.05.2021).
2. 10 самых сильных землетрясений в истории Крыма. URL: <https://zen.yandex.ru/media/chronotope/10-samyh-silnyh-zemletriasenii-v-istorii-kryma.html> (дата обращения: 12.05.2021).
3. Лаговский И.К. Безопасность прежде всего / И.К. Лаговский // Наука и жизнь № 4. Изд.-во «Правда», Москва, 1990. – С. 65 – 73.
4. Вибрации в технике: Справочник. В 6-ти т. Т. 6. Защита от вибраций и ударов / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Машиностроение, 1981. – 456 с.
5. Назин В.В. Индустриализация строительства сооружений сейсмостойкой конструкции / В.В. Назин // Изд.-во «Будівельник», Киев, 1977. – 92 с.
6. Бохонский А.И. Применение пластических связей-ограничителей в системе сейсмозащиты зданий / А.И. Бохонский // ЦИНИС Госстроя СССР. Реф. информация. Серия XIV. Вып. 4. – Москва, 1978. – С. 31 – 35.
7. Бохонский А.И. Деформация упругопластических систем при сейсмическом воздействии / А.И. Бохонский // Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Сопротивление материалов и сооружение зданий. Вып. XXV. Изд.-во «Будівельник», Киев,

1975. – С. 77 – 81.
8. Бохонский А.И. Пространственные колебания упругопластических систем при сейсмическом воздействии / А.И. Бохонский, Л.Ш. Килимник // Науч.-техн. ж. – Строительная механика и расчет сооружений. – № 5. Изд.-во лит. по строительству. – Москва, 1981. – С. 33 – 38.
 9. Исаев А.В. Динамика объектов с физически нелинейными силовыми характеристиками / А.В. Исаев // Вестник СевГТУ. Вып. 38: Механика, энергетика, экология. Севастоп. нац. техн. ун-т. – Севастополь: Изд.-во СевНТУ, 2002. – С. 53 – 58.

References

1. How the NPP safety system works. URL: <https://www.popmech.ru/technologies/kak-ustroena-sistema-bezopasnosti-aes.html> (date accessed: 05.12.2021).
2. 10 strongest earthquakes in the history of Crimea. URL: <https://zen.yandex.ru/media/chronotope/10-samyh-silnyh-zemletriasenii-v-istorii-kryma.html> (date accessed: 05.12.2021).
3. Lagovsky I.K. Safety first of all / I.K. Lagovsky // Science and Life No. 4. Pravda Publishing House, Moscow, 1990. – pp. 65 – 73.
4. Vibrations in Engineering: A Handbook. In 6 volumes. V. 6. Protection against vibrations and shocks / Ed. K.V. Frolov. – M.: Mashinostroyeniye, 1981. – 456 p.
5. Nazin V.V. Industrialization of construction of earthquake-resistant structures / V.V. Nazin // Publishing house "Budivelnik", Kiev, 1977. – 92 p.
6. Bokhonskiy A.I. The use of plastic restraints in the seismic protection system of buildings / A.I. Bokhonskiy // CINIS of the USSR State Construction Committee. Ref. information. Series XIV. Issue 4. – Moscow, 1978. – pp. 31 – 35.
7. Bokhonskiy A.I. Deformation of elastoplastic systems under seismic impact / A.I. Bokhonskiy // Rep. mezhd. scientific and technical Sat. - Resistance of materials and construction of buildings. Issue XXV. Publishing house "Budivelnik", Kiev, 1975. – pp. 77 – 81.
8. Bokhonskiy A.I. Spatial vibrations of elastoplastic systems under seismic impact / A.I. Bokhonskiy, L. Sh. Kilimnik // Scientific and technical. g. - Structural mechanics and calculation of structures. – No. 5. Publishing house lit. for construction. – Moscow, 1981. – pp. 33 – 38.
9. Isaev A.V. Dynamics of objects with physically nonlinear power characteristics / A.V. Isaev // Bulletin of SevGTU. Issue 38: Mechanics, Energy, Ecology. Sevastop. nat. tech. un-t. – Sevastopol: Publishing house of SevNTU, 2002. – pp. 53 – 58.

УДК 656.085.6:539.8

О последствиях взрыва в негерметичном отсеке судна

А.В. Исаев¹, К.Б. Матузаев²¹ФГБВОУ ВО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова»
Дыбенко Павла, 1А, г. Севастополь, 299028, Россия, alexey9588@yandex.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, k.b.matuzaev@sevsu.ru

Статья поступила 04.05.2021 г.; после доработки 07.05.2021 г.

Аннотация

Анализируются физические процессы при внутренних взрывах с использованием разгрузочных отверстий по существующим литературным источникам. Рассмотрены и оценены (с учетом допущений) величины взрывных нагрузок. Дан пример вычисления параметров взрывного процесса в негерметичном отсеке судна.

Ключевые слова: анализ последствий, взрыв, негерметичный отсек судна.

On the consequences of an explosion in a leaky compartment of a ship

A.V. Isaev¹, K.B. Matuzaev²¹Black Sea Higher Naval College named after P.S. Nakhimova, 1A Dybenko Pavla st., Sevastopol, 299028, Russia,
alexey9588@yandex.ru²Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, k.b.matuzaev@sevsu.ru

Received 04.05.2021 y.; received in final form 07.05.2021 y.

Abstract

Physical processes during internal explosions with the use of discharge openings are analyzed according to existing literary sources. Considered and evaluated (taking into account the assumptions) the magnitude of the explosive loads. An example is given of calculating the parameters of the explosive process in an unpressurized compartment of a ship.

Keywords: analysis of consequences, explosion, leaky compartment of a ship

Введение

Аварии на кораблях и судах флота, к сожалению, происходят достаточно часто. Причины разные, но традиционные две – это низкий профессиональный уровень личного состава и устаревшая техника. Пожар на судне распространяется быстро и часто приводит к тяжелым последствиям, а 20% пожаров и взрывов заканчиваются гибелью судна или его полным конструктивным разрушением. Из всех судовых взрывопожарных происшествий 25% приходится на машинные отделения с повреждением энергетической установки. И последние годы в этом плане они не

стали исключением, в т.ч. связанные с эксплуатацией систем (сосудов) под давлением, являющиеся объектами повышенной опасности, т.к. при нарушении их герметичности и режимов эксплуатации возможны взрывы большой мощности, за счет высвобождения потенциальной энергии сжатого газа и действия кинетической энергии. Что особенно опасно в замкнутых пространствах.

Приведем лишь примеры, некоторые из них:

- на борту корабля МПК-105 в Балтийске 7.02.2007 года произошел взрыв и пожар с серьезными повреждениями. ОД БФ сооб-

шил, что причиной взрыва стал не боекомплект на борту, а сжатый воздух;

- на пароме ро-ро Spirit of British Columbia, Ванкувер, 9.02.2010 года произошел взрыв в машинном отделении из-за выхода из строя блока цилиндров (crankcase). Взрыв причинил существенные повреждения;
- на теплоходе «Транс Россия» в Санкт-Петербурге 2.03.2013 года произошел взрыв кислородного баллона в машинном отделении. Пожара не было, пострадавших госпитализировали;
- на сторожевом корабле во время ремонта на судостроительном заводе «Алмаз» в Санкт-Петербурге 11.04.2018 года в дизельно-генераторном отсеке произошел взрыв газового баллона без последующего возгорания;
- на судне «ВФ Танкер-16» в порту Махачкалы 11.07.2019 года произошел взрыв газовоздушной смеси и пожар в машинном отделении. Были погибшие и госпитализированные;
- на крупнейшей плавбазе «Всеволод Сибирцев» в Находке 1.05.2021 года произошел взрыв газового баллона. Взрыв значительно повредил балластный танк при водоизмещении судна 32 тыс. тонн.

Причины взрывов газовых баллонов могут быть самые различные [1]:

- наличие микротрещин и коррозии, которые снижают их прочность;
- удары или падение, особенно при высоких или низких температурах, т.к. в первом случае резко возрастает давление в баллоне за счет нагревания содержащегося в нем газа, а во втором – возникает хрупкость металла;
- переполнение сжиженным газом без оставления свободного нормируемого объема около 10% всего объема;
- влияние высоких температур, в т.ч. солнечных лучей, когда происходит резкое увеличение давления, например, при повышении температуры с 10° С до 500° С в аммиачном баллоне давление возрастает с 6 атм. до 600 атм., происходит его разрушение, т.к. его допустимое давление – 100 атм.;
- ошибочное заполнение другим газом;
- длительное хранение;
- брак сварного шва;
- попадание масла на вентиль кислородных баллонов, т.к. в результате окисления масла может произойти его воспламенение и

взрыв;

- наличие ржавчины или окалины в неисправном баллоне, при движении которых могут возникнуть искры и накапливаться статическое электричество с последующим искрообразованием, что может вызвать взрыв кислорода в баллоне;
- быстрый отбор газа из баллона также может вызвать искрообразование в струе O_2 .
- низкое качество пористой массы ацетиленовых баллонов, быстрый отбор газа из баллона, что может вызвать вынос ацетона. Ацетилен в обычных баллонах (без пористой массы) взрывается при давлении более 0,1 МПа.

В свою очередь в [2] отмечается, что основными причинами взрывов газовых баллонов являются: механическое повреждение (16%), перегрев (15%), коррозия металла (20%), неправильная эксплуатация (24%), утечка газа (25%).

Также взрыв характерен для судовых компрессоров и трубопроводов высокого давления при их неправильной эксплуатации – в момент адиабатического сжатия, когда возникает прогрессивный саморазогрев-воспламенение.

Известны случаи [3], когда взрыв происходит внутри негерметичного отсека с ослаблением внешнего воздействия. Возможно, наряду с переборками обычного назначения, создание специальных экранов для защиты от взрывов с энергетическими взрывчатыми веществами (ВВ) в отсеках.

Постановка задачи

В данной статье необходимо проанализировать воздействие ударной волны при внутренних взрывах для определения величин взрывных нагрузок.

Анализ последствий взрыва в негерметичном отсеке

Горящая переборка уменьшает избыточное давление P_r и импульс i_r , предотвращая разлет осколков и локализуя термическое действие взрыва внутри отсека. Параметры взрывной волны зависят от массы заряда W , объема отсека V и коэффициента негерметичности α – отношения площадей разгрузочных отверстий и внутренней поверхности отсека. При известной полной энергии взрыва E величина

$$W = E / (4,52 \cdot 10^6).$$

Действие взрывной волны, генерируемой детонацией заряда внутри отсека, рассмотрено в двух стадиях. Первая – нагружение при первом воздействии на переборки взрывной волны. Здесь переборки испытывают действие отраженной волны малой длительности, а во второй стадии – действие нескольких последующих импульсов давления. Амплитуда импульсов снижается с течением времени вследствие необратимых термодинамических процессов. Форма импульсов достаточно сложна из-за многократного отражения взрывных волн, как в герметичных, так и в негерметичных отсеках, снабженных разгрузочными отверстиями, через которые истекают продукты взрыва. Максимальная величина начальной нагрузки на переборки отсека при внутреннем взрыве оценивается с помощью законов подобия либо формул для случая нормального отражения взрывной волны от жесткой преграды [4].

На рис. 1 показано мгновенное распределение давлений при взрыве внутри негерметичного отсека, когда переборки подвергаются действию отраженной волны, причем реализуется косое падение для всей поверхности.

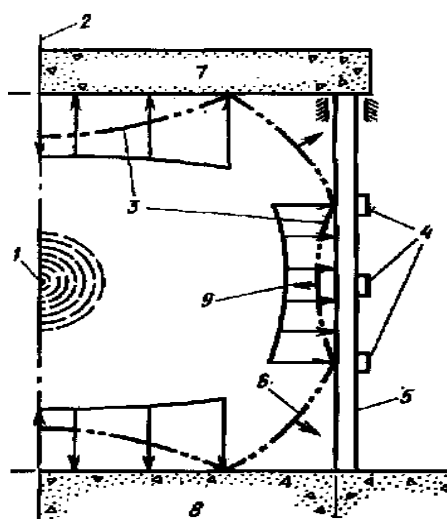


Рис. 1. Схема процесса отражения взрывных волн от внутренних переборок отсека: 1 – заряд ВВ; 2 – ось симметрии; 3 – отраженная ударная волна; 4 – разгрузочные отверстия; 5 – переборка; 6 – падающая взрывная волна; 7 – подволок; 8 – палуба; 9 – волна Маха.

Образуются волны Маха, когда угол падения достаточно велик и локальное давление сильно растет в местах соединения переборок при отражении взрывной волны от горизонтальных перекрытий вблизи оси симметрии отсека. Волны распространяются от переборок к центру

отсека, сталкиваясь в центральной внутренней его части; амплитуда их возрастает, образуя вторичную взрывную волну, вновь падающую на переборки отсека. Избыточная амплитуда вторичной волны оказывается несколько меньше падающей; поэтому после нескольких циклов отражения взрывных волн от переборок и геометрического центра отсека действие избыточного внутреннего давления на переборки прекращается.

Нагрузка на переборки отсека может быть измерена обычными методами или рассчитана в случае отсеков достаточно симметричной конфигурации (рис. 2). В отсеках взрывную нагрузку, развивающуюся при взрыве источника, расположенного на оси камеры, можно рассчитать с помощью численных алгоритмов из [5].

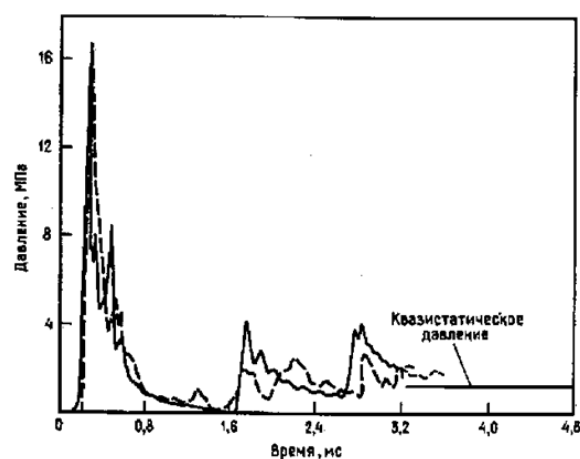


Рис. 2. Расчетное (сплошная линия) и измеренное (штриховая) давления на переборку отсека [6].

Для конфигураций при расположении взрывного источника не на оси отсека или в случае отсеков сложной формы взрывную нагрузку достаточно сложно рассчитать даже с использованием прикладных математических пакетов на ЭВМ и для ее определения необходимо проведение экспериментов. Большое количество экспериментальных данных о взрывных нагрузках, развивающихся внутри объемов различных форм при равномерном распределении разгрузочных отверстий их поверхностях, получено в [6].

Хотя динамика нагружения в случае отсека реальной геометрии достаточно сложна [7], тем не менее, с помощью законов подобия для отраженных волн и нескольких допущений удастся получить оценки величины взрывной нагрузки при внутренних взрывах.

Первое допущение состоит в том, что падающая и отраженная волны имеют треугольные

профили.

Длительности эффективных волн не совпадают с реальными временами T_r действия взрывной волны; их задают так, чтобы сохранить правильное значение импульса взрывной волны (второе допущение).

Третье допущение основано на том, что в большинстве случаев параметры внутренней взрывной нагрузки на переборки можно определить с использованием параметров нормальной (прямой) отраженной волны при косом отражении волн от переборок (при условии, что в качестве расстояния от центра взрывного источника до соответствующей точки на внутренней поверхности отсека учитывается реальное расстояние между этими точками). Для сильных ударных волн это предположение практически точно выполняется вплоть до значений угла падения, близких к предельному углу регулярного отражения, который для воздуха составляет 39° , а для слабых ударных волн это допущение возможно вплоть до угла падения 70° .

При ограниченной внутренней поверхности переборок отсека отраженные волны могут «сталкиваться» и усиливаться, но их амплитуда успевает снизиться до очередного столкновения с переборкой. Для получения приближенной оценки амплитуд вторичных взрывных волн принимают, что вторая, отраженная от переборки волна, имеет вдвое меньшую амплитуду и импульс, чем первая отраженная волна; третья волна также имеет вдвое меньшую амплитуду и импульс, чем вторая, и что вкладом всех остальных циклов отражения можно пренебречь. Времена действия второй и третьей отраженных волн предполагаются равными времени действия первой отраженной от переборок отсека.

Важным допущением является время пробега волны $t_r = 2 \cdot t_a$, т.е. время между моментами последовательного отражения взрывных волн от переборок отсека, и скорость их распространения ниже скорости первой волны. Изменение с течением времени нагрузки в некоторой внутренней точке отсека, рассчитанное на основе перечисленных упрощающих предположений, схематично показано на рис. 3.

С учетом использованных выше допущений суммарная нагрузка на переборки отсека в 1,75 раза превосходит нагрузку от первого импульса давления. Поэтому для отсеков с характерным временем отклика, превышающим длительность третьего импульса давления, используют еще более сильное упрощение, объединив все три импульса давления в один и умножив амплитуду и

импульс волны на множитель 1,75.

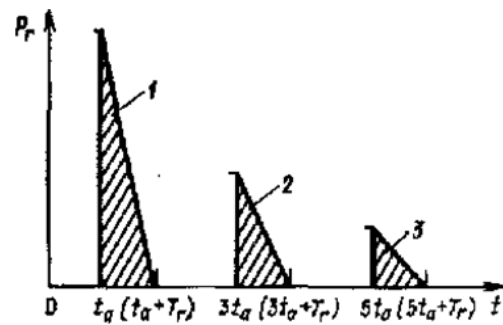


Рис. 3. Схема скачков давления на переборки отсека корабля при внутреннем взрыве: 1, 2, 3 – соответственно скачки, характеризующиеся P_r и i_r .

Таким образом, при взрыве заряда внутри отсека возникающая взрывная волна, отражаясь от переборок, сходится к геометрическому центру отсека, и вновь падает на переборки, и так повторяется несколько раз. Амплитуда взрывной волны после каждого цикла отражения снижается и избыточное давление в отсеке с течением времени уменьшается, причем время спада давления зависит от объема отсека и площади разгрузочных отверстий, через которые продукты взрыва или сгорания истекают из отсека, а также от типа ВВ и соответствующего темпа энерговыделения при взрыве.

На рис. 4 показана типичная временная зависимость избыточного давления на переборки отсека при наличии в них разгрузочных отверстий. Процесс многократного отражения взрывной волны от переборок отсека и динамика изменения давления, как в герметичных, так и в негерметичных отсеках со сравнительно небольшими разгрузочными отверстиями исследовались в основном в период второй мировой войны в связи с изучением последствий взрывов бомб и зарядов ВВ внутри помещений.

На практике получены [6] зависимости максимального избыточного давления при $A/V^{2/3} \leq 0,0215$ и $W/V < 5 \text{ кг/м}^3$, где A – площадь внутренней поверхности отсека. Экспериментальные данные аппроксимируются кривой теплоты взрыва (сгорания) при малых W/V и больших V/W . Предложена зависимость квазистатического давления от времени в виде: $\ln \bar{P} = \ln \bar{P}_1 - 2,13 \ln \bar{\tau}$, где $\bar{P} = P(t)/p_0$ и $\bar{P}_1 = (P_{kc} + p_0)/p_0$ – нормализованные давления; P_{kc} – квазистатическое давление; $\bar{\tau} = A\alpha a_0 t/V$; a_0 – скорость звука в воздухе; t

– время. Полное безразмерное время истечения продуктов взрыва $\bar{\tau}_{max} = 0,4695 \cdot \ln \bar{P}_I$.

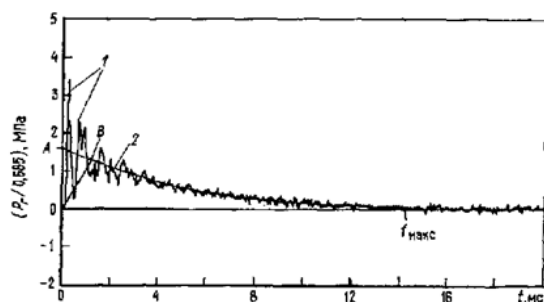


Рис. 4. Зависимость избыточного давления на переборках от времени: 1 – отраженные волны; 2 – приближенное значение квазистатического давления

Необратимые процессы, ослабляя взрывную волну, переводят энергию взрыва в энергию квазистатического сжатия [8]. Некорректно считать максимальным квазистатическим давлением его значение в точке A (рисунок 4).

С учетом временной задержки установления давления сопоставление практических данных и теоретических расчетов правильнее было бы проводить в точке B. Точное определение времени действия избыточного давления проблематично, т.к. амплитуда пульсаций давления сильно уменьшается, а давление приближается к нулевому значению асимптотически; t_{max} – отмечена на рисунке 4.

В наиболее общем случае из теории подобия закон изменения давления при взрыве в отсеке с разгрузочными отверстиями для истечения продуктов взрыва выглядит так: $\bar{P} = P/p_0 = f(P_I, \bar{\tau}, \gamma)$, где γ – отношение удельных теплоемкостей газа. Тогда безразмерный импульс газа $\bar{i}_g = i_g (A \alpha \alpha_0 / p_0 V) = \{ [\exp(2,13 \cdot \bar{\tau}_{max}) - 1] - \bar{\tau}_{max} \} / 2,13$.

Как видно из рисунка 5, в отсеке с разгрузочным отверстием (сплошная линия) линейно растет с течением времени от начального значения p_0 до значения, определяемого пересечением при $t = t_I$ с экспоненциально спадающей кривой от начального значения P_I (при $t = 0$). Последующий спад давления с ростом времени происходит по закону $P(t) = P_I \exp(-ct)$ и продолжается до пересечения с прямой, отвечающей внешнему давлению, в момент времени $t = t_{max}$. Из рисунка 5 находим

$$i_g = \int_0^{t_{max}} [P(t) - p_0] dt = [I - \exp(-ct_{max})]/c - p_0 t_{max}$$

Будем считать, что время t_I совпадает с моментом окончания взрывного нагружения переборки отсека (рисунок 3), т.е. $t_I = 5t_a + T_r$.

Максимальное значение P_{kc} на стадии квазистатического нагружения переборки отсека, имеющих разгрузочные отверстия, равно статическому избыточному давлению, которое имело бы место в герметичном отсеке до начала его снижения вследствие теплопотерь [9].

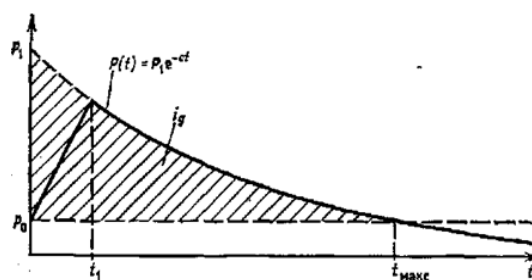


Рис. 5. Изменение давления в негерметичном отсеке с течением времени.

Согласно экспериментальным и расчетным данным из [6] график на рисунке 6, полученный с использованием [10], позволяет с достаточной точностью определить P_{kc} по известным значениям массы ВВ W и внутреннего объема отсека V .

Другие характеристики процесса истечения газа, кроме параметра P_{kc} или $P_I = P_{kc} + p_0$, рассчитываются с помощью графических зависимостей или уравнений для описанных выше безразмерных комплексов. Величина c в уравнении приближенно определяется так: $c = 2,13(\alpha A \alpha_0 / V)$.

Для воздуха при нормальных условиях $\alpha_0 = 340$ м/с, поэтому $c = 725 \cdot (\alpha A / V)$, где A измеряется в m^2 , V – в m^3 и c – в s^{-1} .

На рисунках 7 и 8, полученных также с использованием [10], показаны зависимости безразмерного времени действия избыточного давления $\bar{t}_{max}$ и нормализованного импульса газа $\bar{i}_g$ от безразмерного начального давления взрыва $\bar{P}_I = P_I / p_0$.

Для использования при расчетах эти зависимости в размерном виде будут

$$i_g = \bar{i}_g(p_0 V / \alpha A \alpha_0), \quad t_{max} = \bar{t}_{max}(V / \alpha A \alpha_0).$$

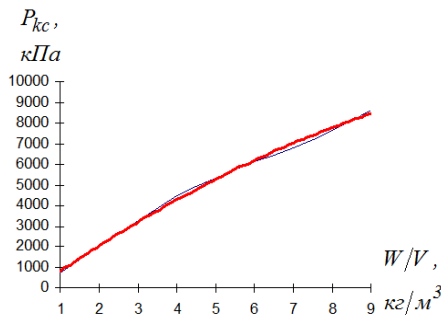


Рис. 6. График $P_{kc} = P_{kc}(W/V)$.

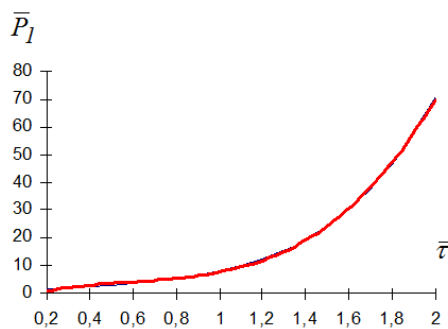


Рис. 7. График $\bar{P}_l = \bar{P}_l(\bar{\tau})$.

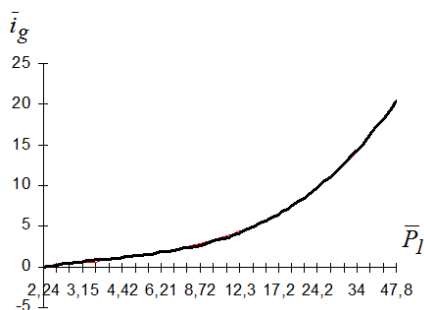


Рис. 8. График $\bar{i}_g = \bar{i}_g(\bar{P}_l)$.

Пример. Дано: в отсеке судна в районе мидель-шпангоута происходит взрыв эквивалентный заряду тротила $W = 30$ кг. Внешние условия: $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $a_0 = 340$ м/с. Объем отсека $V = 300$ м³, площадь разгрузочных отверстий $A_p = \alpha \cdot A = 4$ м². Найти: параметры взрывного процесса в отсеке судна.

Из рисунка 6 находим, что при $W/V = 0,1$

кг/м³ величина $P_{kc} = 4 \cdot 10^5$ Па, и, следовательно, $P_l = P_{kc} + p_0 = 5,065 \cdot 10^5$ Па, $\bar{P}_l = (5,065/1,013)10^5 = 5$.

С помощью рисунка 7 находим, $\bar{\tau} = 0,75$,

а из рисунка 8 получим $\bar{i}_g = 1$,

$$t = \bar{\tau} V / a_0 A_p = 0,165 \text{ с},$$

$$i_g = \bar{i}_g p_0 V / A_p a_0 = 0,22831 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \text{с}.$$

Заключение

Рассмотренный подход позволяет с достаточной для практики точностью оценить характерные величины взрывных нагрузок.

Такие явления актуальны в связи с необходимостью проектирования отсеков судов, снабженных устройствами для истечения продуктов взрыва в условиях достаточной прочности переборок и взрывах маломощных источников.

Список литературы

1. Никольский Б.П., Григоров О.Н., Позин М.Е. Справочник химика, в 7 томах. – М., Л.: Химия, 1965 – 1968, 1971. – 3340 с.
2. Плотникова Г.В., Бодров Д.А. Взрывы газовых баллонов, причины и последствия // Вестник Восточно-Сибирского института МВД России. – 2013. – № 1(64). – С. 70 – 78.
3. Крючков Ю.С., Гусаров И.И. и др. Ударостойкость судового энергетического оборудования. – Л.: Судостроение, 1973. – 252 с.
4. Ионов В.Н., Огибалов П.М. Напряжения в телах при импульсном напряжении. – М.: Высш. школа, 1975. – 463 с.
5. Вибрации в технике: Справочник. – М.: Машиностроение. – Т. 6. Защита от вибрации и ударов / под ред. К.В. Фролова, 1981. – 456 с.
6. Бейкер У., Кокс П., Уэстайн П., Кулеш Д., Стреллоу Р. Взрывные явления. Оценка и последствия. Т 1, 2. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 702 с.
7. Гвоздев А.А. К расчету конструкций на действие взрывной волны / Строительная промышленность. – 1943. – № 1-2 – С. 18 – 21.
8. Зукас Д.А., Николас Т., Свифт Х.Ф., Грешук Л.Б., Курран Д.Р. Динамика удара. – Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 296 с.
9. Харрис С.М., Крид Ч.И. Справочник по ударным нагрузкам. – Пер. с англ. – Л.: Судостроение,

1980. – 360 с.

10. Кирьянов Д.В. Mathcad 15. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012 – 432 с.

References

1. Nikolsky B.P., Grigorov O.N., Pozin M.E. Chemist's Handbook, in 7 volumes. – M., L.: Khimiya, 1965 – 1968, 1971. – 3340 p.
2. Plotnikova G.V., Bodrov D.A. Explosions of gas cylinders, causes and consequences // Bulletin of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. – 2013. – No. 1 (64). – pp. 70 – 78.
3. Kryuchkov Yu.S., Gusarov I.I. etc. Impact resistance of ship power equipment. – L.: Shipbuilding, 1973. – 252 p.
4. Ionov V.N., Ogibalov P.M. Stresses in bodies at impulse voltage. – M.: Higher school, 1975. – 463 p.
5. Vibrations in technology: A Handbook. – M.: Machine building. – T. 6. Protection from vibration and shock / ed. K.V. Frolova, 1981. – 456 p.
6. Baker U., Cox P., Westine P., Kulesh D., Strelow R. Explosive phenomena. Assessment and consequences. T 1, 2. – Per. from English – M.: Mir, 1986. – 702 p.
7. Gvozdev A.A. To the calculation of structures for the action of a blast wave / Construction industry. – 1943. – No. 1-2. – pp. 18 – 21.
8. Zukas D.A., Nicholas T., Swift H.F., Greshchuk LB, Curran D.R. Impact dynamics. – Per. from English. – M.: Mir, 1985. – 296 p.
9. Harris S.M., Creed C.I. Handbook on shock loads. – Per. from English. – L.: Shipbuilding, 1980. – 360 p.
10. Kiryanov D.V. Mathcad 15. – SPb.: BHV-Petersburg, 2012 – 432 p.

УДК 621.039.54

Использование в конструкции тепловыделяющей сборки реактора ВВЭР перемешивающих решеток и их влияние на гидродинамические процессы в активной зоне реактора

А.Д.Тимофеев, В.В. Шаповаленко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия shapovalenkovita@rambler.ru

Статья поступила 07.04.2021 г.; после доработки 09.04.2021 г.

Аннотация

Проведен расчет потерь давления от местных сопротивлений от перемешивающих решеток разной конструкции, определена из них наиболее эффективная с точки зрения наименьших потерь давления, выбрана наиболее выгодная схема расположения решеток по высоте ТВС.

Ключевые слова: перемешивающие решетки, гидравлические сопротивления, потери давления от местных сопротивлений, тепловыделяющая сборка.

Use in the design of the fuel assembly of the reactor VVE stirring grilles and their effect on hydrodynamic processes in the active zone of the reactor

A.D.Timofeev, V.V. Shapovalenko

Scientific-educational center "Advanced technologies and materials", Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., 299053, Sevastopol, Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., 299053, Russia shapovalenkovita@rambler.ru

Received 07.04.2021y.; received in final form 09.04.2021y.

Abstract

The calculation of pressure losses from local resistances from mixing grids of different designs is carried out, the most effective from the point of view of the least pressure losses is determined, the most advantageous layout of the gratings along the fuel assembly height is selected.

Keywords: Stirring lattices, hydraulic resistance, pressure loss from local resistance, fuel assembly.

Введение

Один из способов повышения теплотехнической надежности активной зоны ядерного реактора типа ВВЭР является использование перемешивающих решеток в тепловыделяющих сборках (ТВС). Данный способ позволяет повысить значение критического теплового потока, а, следовательно, и тепловую мощность ядерно-

го реактора при сохранении достаточного запаса до кризиса теплоотдачи.

Конструкция перемешивающих решеток позволяет дополнительно турбулизовать поток теплоносителя, и тем самым выравнять температуру теплоносителя по радиусу ТВС и создать равные условия охлаждения тепловыделяющих элементов.

Таким образом, перемешивающие решетки

создают условия безопасной эксплуатации ядерного реактора, не допуская нарушений теплоотвода от ТВЭЛОВ.

Цель и задачи научного исследования

Задачами работы является исследовать влияние применения различных видов перемешивающих решеток на гидравлическое сопротивление активной зоны ВВЭР с целью определения наиболее эффективного их применения.

Влияние на гидродинамические процессы в активной зоне применения перемешивающих решеток в составе конструкции ТВС

Рассматриваются два вида перемешивающих решеток: сотовая дистанционирующая решетка-интенсификатор (СДРИ), которая собрана из ячеек сложной конфигурации, имеющих на поверхности разнонаправленные пуклевки, и дистанционирующая решетка-интенсификатор с установкой в ней завихряющего элемента в виде наклонной лопатки (ДРИЛ).

Каждая из них обеспечивает повышение теплосъема с поверхности оболочки ТВЭЛ за счет дополнительной турбулизации потока теплоносителя.

Кроме того, решетки СДРИ и ДРИЛ обладают ещё одной функцией – дистанционирование ТВЭЛОВ. Поэтому эти решетка-интенсификаторы могут устанавливаться вместо дистанционирующих решеток.

Гидравлическое сопротивление решеток в значительной мере определяется их конструкцией. Потери давления от местных сопротивлений рассчитываются по следующей формуле:

$$\Delta p_i = \sum \xi_i \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}, \text{ Па} \quad (1)$$

где ω – средняя скорость движения теплоносителя в ТВС, м/с;

ρ – средняя плотность теплоносителя в ТВС, м³/кг;

ξ_i – коэффициент местного сопротивления ТВС.

В общем случае коэффициент местного сопротивления ТВС можно представить как сумму коэффициентов сопротивлений на входе, выходе ТВС и от каждой решетки:

$$\sum \xi_m = \xi_{вх} + \xi_{вых} + \xi_{др} + \xi_{пр} \quad (2)$$

где $\xi_{вх}$ – коэффициент местных сопротивлений на входе в ТВС,

$\xi_{вых}$ – коэффициент местных сопротивлений на выходе из ТВС,

$\xi_{др}$ – коэффициент местных сопротивлений от дистанционирующей решетки,

$\xi_{пр}$ – коэффициент местных сопротивлений от перемешивающей решетки (решетки-интенсификатора).

Коэффициент местного сопротивления либо рассчитывается по эмпирическим зависимостям, либо принимается на основании экспериментальных данных.

В таблице 1 приведены значения коэффициентов местного сопротивления решеток различных модификаций, полученные в результате проведенных экспериментов в Курчатовском институте.

Таблица 1. Таблица значений коэффициентов местных сопротивлений [2].

$\xi_{вх}$	$\xi_{вых}$	$\xi_{др}$	$\xi_{пр}$ СДРИ	$\xi_{пр}$ УДРИ
0,8	0,8	0,36	1,05	0,52

В расчет приняты следующие исходные данные:

- средняя температура теплоносителя в активной зоне ядерного реактора 310 °С;
- максимальная скорость движения в теплоносителя 6 м/с;
- давление теплоносителя в первом контуре 16 МПа.

Расчет потерь давления от ТВС выполнен при средних значениях температуры теплоносителя в ядре потока и заданном давлении в первом контуре, с помощью таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара [2]

Максимальная скорость движения теплоносителя в ТВС активной зоны ядерного реактора типа ВВЭР не должна превышать 6 м/с. Это ограничение связано с рядом факторов.

Во-первых, при увеличении скорости теплоносителя возрастают в квадрате потери давления, а также возрастает расход теплоносителя, что приводит к увеличению мощности ГЦН.

Во-вторых, с ростом скорости теплоносителя увеличивается эрозийный износ оболочки ТВЭЛА.

В-третьих, увеличивается вибрация ТВЭЛОВ, которая может привести к их разрушению.

В работе исследуется для каждой в отдельности перемешивающей решетки СДРИ и ДРИЛ три варианта расстановки в тепловыделяющей сборке.

Вариант 1. Всего в тепловыделяющей сборке 10 решеток, из них 7 дистанционирующих решеток и 3 перемешивающих решетки, расположенных в верхней части ТВС.

Вариант 2. В ТВС по высоте в количестве 10 штук устанавливаются только перемешивающие решетки.

Вариант 3. По высоте ТВС установлены 10 дистанционирующих решеток и дополнительно 3 перемешивающих решетки в верхней части ТВС, расположенных между дистанционирующими решетками.

Потери давления от ТВС с перемешивающей решеткой типа СДРИ, а также для ТВС с решеткой УДРИ могут быть определены по формуле:

$$\Delta p_{\text{твс}} = \sum \xi_m \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} \quad (3)$$

Результаты расчета гидравлических сопротивлений от ТВС с разной схемой расстановки перемешивающих решеток разного типа представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты расчета гидравлических сопротивлений от ТВС с разной схемой расстановки перемешивающих решеток разного типа [2].

Компоновка ТВС	ξ_{np}	$\sum \xi_i$	Δp_i , Па
Схема расстановки решеток в ТВС: 3 ПР+7ДР			
3 СДРИ+ 7 ДР	1,05	7,27	91864
3 ДРИЛ+ 7ДР	0,52	5,68	71772
Схема расстановки решеток в ТВС: 10 ПР расположены по высоте ТВС			
10 СДРИ	1,05	12,1	152896
10 ДРИЛ	0,52	6,8	85925
Схема расстановки решеток в ТВС. По высоте ТВС расположено 10ДР и дополнительно 3 ПР в верхней части ТВС между ДР			
3 СДРИ +10 ДР	1,05	8,35	105511
3 ДРИЛ + 10ДР	0,52	6,76	85419

Выводы

Из расчета видно, что наименьшими потерями давления от местных сопротивлений и соответственно наименьшими потерями давления обладает та ТВС, в составе которой используется перемешивающая решетка с завихряющими наклонными лопатками.

Наилучшей из рассмотренных схем является второй вариант расстановки перемешивающих решеток в ТВС. При таком расположении перемешивающей решетки исключаются условия возникновения локального подкипания теплоносителя на поверхности оболочки твэла на самом её энергонапряженном участке, где температуры нагрева оболочки тепловыделяющего элемента достигают максимальных значений

Применение в составе ТВС решеток типа ДРИЛ позволяет обеспечить эффективное охлаждение всех тепловыделяющих элементов и достаточную их фиксацию по высоте тепловыделяющей сборки, а особенность исполнения ячейки перемешивающей решетки и наличие завихряющего элемента способствуют более равномерному перемешиванию теплоносителя между соседними ячейками, что приводит к снижению коэффициента неравномерности тепловыделений по радиусу ТВС.

Список литературы

- Шаповаленко В.В. Теплогидравлический расчет ядерных реакторов./В.В.Шаповаленко. - Севастополь: Издательство СевГУ, 2019
- Ривкин С.Л., Александров А.А. Теплофизических свойств воды и водяного пара./С.Л.Ривкин, А.А.Александров. - М.:Энергоатомиздат, 1984
- Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике / П.Л.Кирилов, А.В.Жуков, Н.И.Логинов, В.М.Махин. - М.:ИздАт, 2013.

References

- Shapovalenko V.V. Thermal hydraulic calculation of nuclear reactors. / V.V. Shapovalenko. - Sevastopol: SevGU Publishing House, 2019
- Rivkin S.L., Alexandrov A.A. Thermophysical properties of water and steam. / S.L. Rivkin, A.A. Aleksandrov. - M.: Energo-atomizdat, 1984
- Kirillov P.L. Handbook of thermohydraulic calculations in nuclear power / P.L. Kirilov, A.V. Zhukov, N.I. Loginov, V.M. Makhin. - M.: Publishing house, 2013.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.11.25:681.518.5/027.45

**Анализ состояния системы контроля и управления
на базе платформы ТПТС-НТ на основе информации
по самодиагностике**Н.И.Кузнецова¹, Ю.А.Зимин², В.А.Нурзай³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹nika100452@gmail.com, ²ozon.msr@gmail.com, ³Mengsk777@yandex.ru

Статья поступила 05.04.2021 г.; после доработки 07.04.2021 г.

Аннотация

В данной статье проанализирована эксплуатационная надежность СКУ ЭБ АЭС на базе платформы ТПТС-НТ на основе информации по самодиагностике. Выполнен анализ алгоритмов диагностики системы, а также рассмотрены аппаратные, программные средства, и сервисные устройства, которые обеспечивают диагностирование и самодиагностику платформы. Данная работа позволяет глубже изучить современные технические и программные средства и методы диагностирования, выяснить, как они помогают в обнаружении неисправности при самодиагностике, а также производить причинно-следственный анализ возможных неисправностей при эксплуатации.

Ключевые слова: реакторная установка, диагностика, самодиагностика, комплекс средств автоматизации, платформа ТПТС-НТ, система контроля и управления.

**Analysis of the state of control and management system
based on TPTS-NT platform by the information
of self-diagnosis**N.I.Kuznetsova¹, J.A.Zimin², V.A.Nurzai³Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹nika100452@gmail.com, ²ozon.msr@gmail.com, ³Mengsk777@yandex.ru

Received 05.04.2021 y.; received in final form 07.04.2021 y.

Abstract

This article analyzes the operational reliability of the monitoring and control system of an NPP power unit based on the TPTS-NT platform based on self-diagnostic information. The analysis of algorithms for diagnosing the system is carried out, as well as hardware, software, and service devices that provide diagnostics and self-diagnostics of the platform are considered. This work allows a deeper study of modern technical and software tools, and diagnostic methods, as well as find out how they help in detecting a malfunction during self-diagnosis, as well as perform a cause-and-effect analysis of possible malfunctions during operation.

Keywords: diagnostics, self-diagnostics, a set of automation equipments, TPTS-NT platform, monitoring and control system.

Введение

С помощью СКУ производятся различные измерения с последующей обработкой, контроль

и регулирование большого количества параметров, что позволяет объекту выполнять возложенные на него функции.

СКУ АЭС является важной и сложной си-

стемой, позволяющей безопасно эксплуатировать предприятие и состоящей из большого числа компонентов, что отрицательным образом влияет на надежность, так как, чем сложнее система, тем больше вероятность, что в ней возникнет отказ. Этот факт и определяет важность обеспечения надежности СКУ для надежной работы всей АЭС.

Кроме того, СКУ должна сохранять свою работоспособность длительное время, что также требует повышение показателей надежности. С этой целью используются различные методы резервирования, применение которых зависит от функций, структуры и условий ее эксплуатации.

Целью данной работы является изучение и анализ эксплуатационной надежности СКУ АЭС на базе платформы ТПТС-НТ на основе информации по самодиагностике. Данная работа позволит изучить современные технические и программные средства и методы диагностирования, а также выяснить, как они помогают в обнаружении неисправности при самодиагностике СКУ ЭБ АЭС.

СКУ на базе платформы ТПТС-НТ

КСА ТПТС-НТ имеет модульный принцип построения, что позволяет создавать и наращивать объем аппаратуры в системе управления, в зависимости от требований, а также резервировать важные элементы повышая степень избыточности структуры [1].

Функциональная структура взаимодействия компонентов ТПТС-НТ, представленная на рисунке 1, построена по двухуровневому принципу и имеет нижний и верхний уровень.

На нижнем уровне происходит сбор данных, их фильтрация и индикация, а также выдача управляющих воздействий таких индивидуальное управление, регулирование. Эти функции реализуются в станциях ввода-вывода (СВВ). Они представляют собой набор модулей связи с процессом (МСП), которые производят прием и выдачу сигналов, а также реализацию некоторых базовых функций автоматизации технологического процесса.

Интерфейсный модуль (ИМ), который также находится в составе СВВ, производит сбор всей цифровой информации ото всех МСП и передает на верхний уровень через локальную шину ENL. Приходящую в СВВ информацию по шине ENL, ИМ распределяет по всем МСП в соответствии с адресом.

По шине ввода-вывода (ШВВ) осуществляется связь ИМ и МСП в станции ввода-вывода,

которая организована по радиально-последовательной структуре, что обеспечивает большую скорость передачи информации. Через шины ENL (100 Мбит/с) СВВ связаны с процессорами автоматизации (ПА).

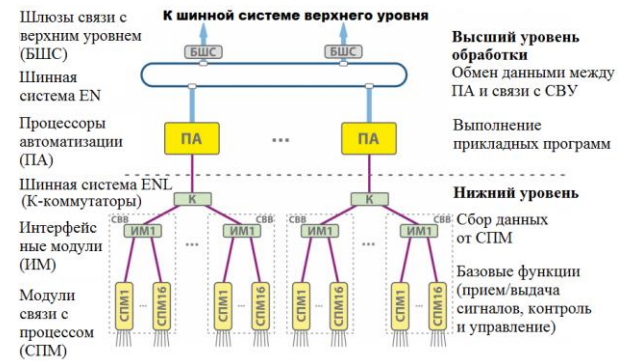


Рис. 1. Функциональная структура ТПТС-НТ

На ПА возложены прикладные функции управления, защит, блокировок, сигнализации, выполнение базовых алгоритмов, функционально-групповое управление и др. ПА предоставляют возможность программирования.

Взаимосвязь между всеми ПА осуществляется по локальной сети EN, основанной на технологии Industrial Ethernet которая обеспечивается скоростью обмена информацией 100 Мбит/с. Связь с системой верхнего уровня (СВУ) осуществляется через шлюзы, которые связывают шину EN и локальную сеть СВУ. Это дает возможность удобной обработки данных, т.к. каждый параметр процесса легко доступен каждому ПА.

КСА ТПТС-НТ обеспечивает резервирование всех составляющих системы, в том числе: ПА, БШС, ИМ, МСП, ШВВ, шины ENL.

Резервированные ПА, ИМ и МСП работают в горячем резерве и связаны по принципу «ведущий-ведомый». Резервирование шин питания осуществляется индивидуально для каждого модуля.

ПТК на базе ТПТС-НТ, содержат общую цифровую коммуникационную оптоволоконную шину EN, которая реализует передачу данных между отдельными ПТК, а также обеспечивает связь с СВУ и с устройством конфигурирования, в качестве которой выступает инженерная станция (ИС).

Связь с интеллектуальными датчиками и исполнительными механизмами осуществляется с помощью специализированных модулей по шинам RS485 с протоколами MODBUS RTU, MODBUS ASCII и Ethernet с протоколом МЭК

61850.

Пример реализации ПТК на базе платформы ТПТС-НТ представлен на рисунке 2.

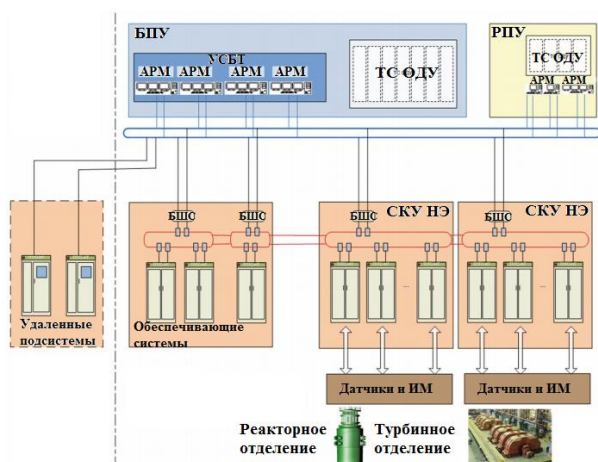


Рис. 2. ПТК на базе платформы ТПТС-НТ

Инженерная станция ТПТС-НТ

Комплект инженерной станции (ИС) ТПТС54.3403-02 предназначен для разработки, корректировки, документирования, сохранения и загрузки прикладного программного обеспечения в процессор автоматизации во время наладки и работ по замене программируемых модулей или программного обеспечения [1].

В состав ИС входит два или более персональных компьютера и устройства вывода информации на печать. Взаимосвязь персональных компьютеров реализуется с помощью сети, построенной по принципу «клиент – сервер», которая представлена на рисунке 3.

Эта структура осуществляет связь с шиной EN для обеспечения возможности визуализации и загрузки программ в модули ПС.

В ИС установлена САПР GET-R1, работающая на базе операционной системы Linux. САПР GET-R1 позволяет создавать компоновочные схемы оборудования, схемы проводных и кабельных связей, прикладные программные структуры ПА, проектировать обмен данными между компонентами ПТК и СВУ.

При помощи ИС можно удаленно конфигурировать любой модуль, в котором предусмотрена функция параметрирования, изменяя его установленные параметры, а также перепрограммировать алгоритм работы любого процессора автоматизации.

В САПР GET-R1 разработаны подходы к сквозному проектированию подсистем АСУ ТП на базе ТПТС, а также разработаны средства

сквозного моделирования и тестирования алгоритмов.

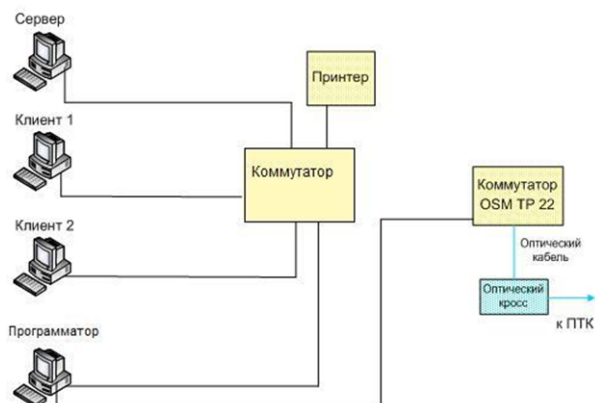


Рис. 3. Сеть инженерной станции

Диагностическая станция ТПТС-НТ

Диагностическая станция ТПТС54.3311 позволяет выполнять:

- диагностику ПА, ИМ и МСП;
- статическую и динамическую имитацию;
- диагностику измерительных каналов модулей связи с процессом;
- чтение значений маркеров и сигналов процессоров автоматизации.

Для работы диагностическая станция (ДС) подключается к шине EN. Доступные режимы работы и ограничения устанавливаются администратором ДС индивидуально для каждого пользователя.

Сервисные устройства. Имитаторы

Имитаторы – это небольшие электронные устройства, предназначенные для имитации реальных исполнительных механизмов, датчиков и индикаторов двоичных сигналов. Они позволяют смоделировать любые технологические ситуации объекта автоматизации, такие как исправная работа оборудования в различных режимах, или же его неисправность. Каждый имитатор подключается к соответствующему модулю ТПТС-НТ. Внешний вид имитаторов представлен на рисунке 4.

Номенклатура имитаторов представляет следующие типы:

- имитатор задвижки ТПТС54.3301;
- имитатор регулирующего клапана ТПТС54.3302;
- имитатор двигателя ТПТС54.3303;
- имитатор соленоидного клапана

ТПТС54.3304;

- имитатор каналов ввода-вывода дискретных сигналов ТПТС54.3305.



Рис. 4. Внешний вид имитаторов

При использовании имитаторы можно держать в руках или же закрепить на приборной стойке, на которой для этого предусмотрены специальные магниты на обратной стороне корпуса. Перед началом работы необходимо подключить кабель выключенного имитатора к клеммам ПС, руководствуясь схемой подключения [3].

Система нормальной эксплуатации на базе ТПТС-НТ

Управляющая система нормальной эксплуатации осуществляет выполнение задач по обеспечению условий, которые позволяют проводить эксплуатацию АЭС без превышения эксплуатационных требований [2].

ТПТС-НТ является комплексом средств автоматизации, которые предназначены для организации интегрированных ПТК СНЭ атомных электростанций, тепловых, и ряда других энергетических и промышленных комплексов.

Структурная схема УСНЭ на базе платформы ТПТС-НТ приведена на рисунке 5.

Аппаратура ТПТС-НТ по сравнению с её предыдущими поколениями обладает улучшенными техническими и более высокими эксплуатационными характеристиками, а именно:

- улучшенное быстродействие;
- универсальные решения компоновки, которые обеспечивают целесообразность использования аппаратуры для автоматизации объектов различных назначений – от малых технологических процессов до атомных энергоблоков;
- увеличенная временная разрешающая способность по обработанным и переданным на

выход сигналам;

- более высокие метрологические параметры.

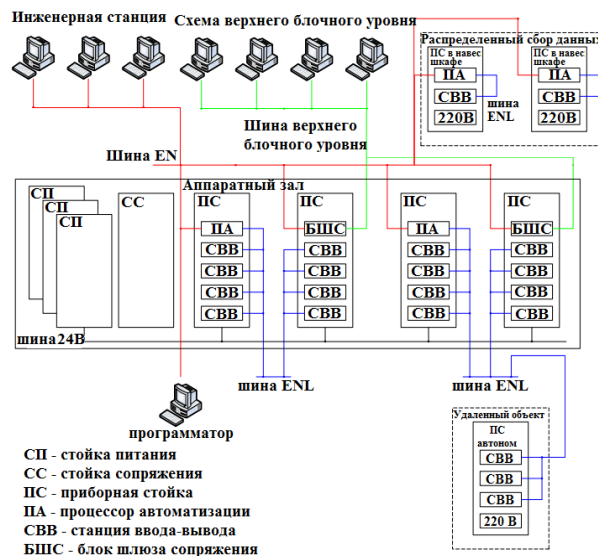


Рис. 5. Структура СНЭ на основе КСА ТПТС-НТ

Аппаратура КСА ТПТС-НТ имеет совместимость с предыдущими поколениями в способе хранения данных, наборе сообщений, способах обмена сообщениями по системной шине, наборе процедур обработки сигналов, интегрированных алгоритмах управления, наборе управляющих команд программы пользователя и наборе программных интерфейсов. Это, несомненно, дает возможность соединять аппаратуры ТПТС разных поколений для выполнения требуемых функций, что представляет собой важное значение из-за постоянной необходимости в модернизации и поддержке АСУ ТП при длительных эксплуатационных сроках АЭС (до 60 лет).

В случае необходимости сопряжения с устройствами, выполняющими определенные функции в технологическом процессе, нужно будет воспользоваться стойкой сопряжения из ТПТС-ЕМ.

Стойка сопряжения представляет собой шкаф с приборами электрического сопряжения, такими как модули гальванического разделения, промежуточные реле, контакторы, а также устройствами сигнализации и элементами, которые используются для закрепления и подключения электрических кабелей. Шкафы ТПТС-НТ и ТПТС-ЕМ одинаковых габаритов 1000×2200×400, а это значит, что изменений в гармоничности расположения аппаратуры в рядах не будет. Также, для ремонта ПТК имеется

комплект имитаторов технических средств.

ТПТС-НТ дает возможность размещать аппаратуру как распределенно, так и централизованно. Такое распределение аппаратуры достигается за счет использования высокоскоростной шины ENL, которая использует технологию Industrial Ethernet 100 Мбит/с. Сбор информации ПА происходит за время равное 5 – 10 мс в зависимости от размеров системы. Также шина ENL дает возможность удаленно устанавливать СВВ относительно ПА.

С помощью модулей связи с процессором аппаратуры ТПТС-НТ осуществляется сбор и первичная обработка данных, а также различные задачи по индивидуальному управлению. За короткое время, порядка 1-20 мс, выполняется прием двоичных и аналоговых сигналов, их фильтрация и уменьшение дребезга сигналов, а также осуществляется разрешение ряда последовательных входных сигналов, которые, в свою очередь, различаются по времени появления на 1 мс.

На уровнях с коммуникационными шинами, станциями ввода-вывода и ПА используется механизм горячего резерва «1 из 2». Структурная схема резервирования ТПТС-НТ изображена на рисунке 6.

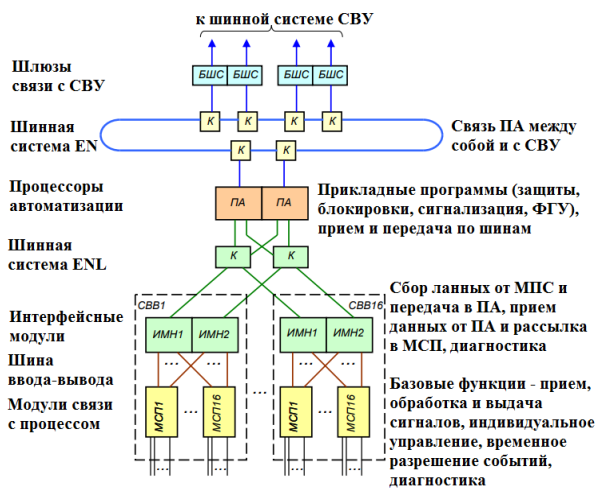


Рис. 6. Схема резервирования ТПТС-НТ

В устройстве ПА решаются различные задачи по блокировкам, сигнализациям, технологические задачи и задачи по функционально-групповому управлению. В ПА установлены процессоры с большой производительностью, и он имеет оптимальную структуру, это позволяет уменьшить время действия алгоритмов до 100-200 мс, а также реализовывать алгоритмы с высокими требованиями по скорости выполнения.

Связь между элементами в ПТК, в системе

автоматики нижнего уровня между ПТК и системами автоматики нижнего уровня с БШС осуществляет система коммуникационных шин. В неё входит системная шина EN, шины ENL, ШВВ и полевые шины RS-485.

В ТПТС-НТ решена проблема, связанная с безударным переключением резерва, который сохраняет работоспособное состояние системы при различных многократных отказах, исключением является только появление отказов в, одновременно, основном и резервном узлах.

Также, как и в шине ENL, в шине EN используется технология Industrial Ethernet 100 Мбит/с. Шина EN представляет собой виртуальное кольцо с соединенными между собой коммутаторами Ethernet, которое образует коммуникационную оптоволоконную магистраль. Путем перенастройки избыточности структуры соединений в кольце можно резервировать данную магистраль.

В составе станции ввода-вывода имеется 2 ИМН и 2 ШВВ. Также, как и шина ENL, ШВВ реализует соединения типа «точка-точка», которое дает возможность подключать МСП к ИМН. В МСП к соответствующему ИМН подключен свой интерфейс ШВВ. Резервирование шин и их соединение «точка-точка» увеличивают быстродействие обмена информацией, а также значительно уменьшают потери большого количества информации, поступающей на вход, при единичном отказе.

Радиальная организация шин дает возможность для более комфортной обработки информации, так как к любому параметру ТП имеет доступ каждый ПА, поскольку каналы для передачи данных обладают большой скоростью. ТПТС-НТ может работать в резервированном и нерезервированном режимах.

Процессорные модули, которые составляют ПА, связаны шиной, обеспечивающей быструю передачу данных, могут работать параллельно и выполнять следующие функции:

- имплементируют низкоуровневую и прикладную логику;
- реализуют функции связи с остальными ПА.

В модулях ПА установлены 32-разрядные микропроцессоры с большой производительностью. Данные модули обеспечивают доступ к ПА до 16 станций ввода-вывода, каждая из которых может содержать до 16 МСП.

Контроллер автоматизации ПА выполняет задачи автоматизации, но только те, которые обладают некоторыми особенностями, например, малым количеством контролируемых параметров, большой распределенностью и скоростным

протеканием контролируемых процессов. Данный контроллер является устройством, которое может выполнять функции ПА и СВВ. КА может использоваться в УСНЭ, УСБ.

Использование контроллера автоматизации способствует более целесообразному и эффективному применению платформы ТПТС-НТ. В составе контроллера входят ПМА, МСП и модули цифровых интерфейсов. Процессорный модуль автоматизации построен по такому же принципу, как и ПА. Модули интерфейсов, аналогично подключению МСП к СВВ, соединяются с ПМА по шине ввода-вывода.

Посредством средств самоконтроля контролируются все элементы

ТПТС-НТ. Индикацию возникновения вышедшего из строя компонента и его замену с/без подключения канала измерения или управления обеспечивает объем оперативного контроля. Отказы, которые были обнаружены, отображаются на модуле, посредством которого он был обнаружен и затем в ПС срабатывает световая сигнализация и происходит передача информации о неисправности по шинам связи в СВУ.

На АЭС ко всему оборудованию предъявляются высокие требования, в том числе и система питания ТПТС-НТ. Она соответствует этим требованиям, но вдобавок к этому имеет возможность резервированного подключения к элементам ТПТС-НТ. Питание происходит постоянным напряжением +24 В [2].

Самодиагностика ТПТС-НТ

Все элементы аппаратуры ТПТС-НТ самодиагностируемы. Индикацию возникновения вышедшего из строя компонента и его замену с/без подключения канала измерения или управления обеспечивает объем оперативного контроля.

Все произошедшие отказы индицируются непосредственно в устройстве, где он возник, либо на ПС, в которой установлен отказавший модуль, с сопровождающей световой сигнализацией и последующей передачей по шинам связи в СВУ.

Приборная стойка. В случае возникновения неисправности в ПС включается световая сигнализация. Сигнальные лампы расположены в верхней части на передней и задней сторонах стойки. Кроме того, в ПС производится контроль состояния дверных контактов, коммутаторов и блоков шлюзов сопряжения.

Модули связи с процессом. МСП постоянно самодиагностируется. Если, при проведении

самодиагностики, обнаружена неисправность, то включается светодиод, сигнализирующий об ошибке, и по ШВВ происходит передача информации об отказе в интерфейсные модули СВВ.

Интерфейсные модули. ИМ постоянно самодиагностируются и выполняют сбор диагностической информации ото всех МПС своей СВВ.

Процессор автоматизации. Основной ПА постоянно самодиагностируется, а в свою очередь резервный следит за состоянием основного. В случае появления отказа, он издает сигнал, соответствующий неисправному состоянию, и формирует сообщение об отказе в систему верхнего уровня. Также ПА накапливает сообщения обо всех отказах ото всех интерфейсных модулей и формирует свое сообщение об отказах в систему верхнего блочного уровня [4].

Заключение

В заключение следует отметить, что произведен анализ структуры системы контроля и управления энергоблока АЭС, построенной на базе платформы ТПТС-НТ. Выявлены существенные преимущества данной платформы.

Платформа ТПТС-НТ имеет богатую диагностическую базу, что позволяет контролировать и прогнозировать состояние СКУ и ее компонентов, во всех режимах работы, а также производить причинно-следственный анализ возможных неисправностей при эксплуатации.

Выполнен анализ алгоритмов диагностики СКУ ЭБ АЭС, а также рассмотрены аппаратные и программные средства, и сервисные устройства, которые обеспечивают диагностирование и самодиагностику платформы.

Аппаратным средством системы является диагностическая станция, которая позволяет выполнять диагностику основных составляющих платформы ТПТС-НТ, а именно, ПА, ИМ и МСП, а также диагностику измерительных каналов.

В качестве сервисных устройств диагностирования выступают имитаторы, позволяющие смоделировать любые технологические ситуации объекта автоматизации, что дает возможность предупреждения и повышения готовности системы к возникновению отказов.

Программным же средством диагностирования, является инженерная станция, которая позволяет разрабатывать, корректировать, выполнять документирование, сохранение и загрузку прикладной структуры в ПА на этапах наладки и работ, связанных с заменой программируемых

модулей или программного обеспечения.

При создании комплекса ТПТС-НТ, использовался положительный опыт эксплуатации предшествующих систем ТПТС, а также были учтены передовые тенденции в области построения АСУ ТП объектов различных отраслей энергетики на государственном и международном уровнях, тенденции развития автоматики и ее элементной базы, достижения мировых лидеров в области науки и техники.

Следовательно, можно утверждать, что системы контроля и управления на современных производствах, являются гарантом безопасной работы предприятия, а своевременная диагностика этих систем позволяет не только удешевить производство, но и уменьшить вероятность возникновения аварийной ситуации.

Список литературы

1. Описание платформы ТПТС-НТ: Справочник.- М.:ВНИИА им. Н.Л. Духова, 2017.- 36 с.
2. Комплект средств автоматизации ТПТС-НТ: Доклад БГУИР / А.Д. Нариц, М.И. Моисеев, П.С. Карпов и др.- М.: ВНИИА им. Н.Л.Духова, 2015. - 5 с.
3. Методические указания по лабораторному практикуму «ПТК АСУТП АЭС»: Учебное пособие. - М.: НИЯУ МИФИ. - 137 с.
4. Каталог продуктов и услуг АО «РАСУ» [Электронный ресурс]. URL: https://rasu.ru/products/catalog_rasu.pdf. (дата обращения 27.01.2021)

References

1. *Opisanie platformy TPTS-NT: Spravochnik* [Description of the TPTS-NT platform: Handbook]. M.:VNIIA im. N.L. Dukhova, 2017. - 36 p.
2. *Komplekt sredstv avtomatizacii TPTS-NT* [A set of automation tools TPTS-NT]: Report BSUIR / A.D. Narits, M.I. Moiseev, P.S. Karpov and others - M.: VNIIA im.N.L.Dukhova, 2015.- 5 p.
3. Methodical instructions for the laboratory practice "PTC APCS NPP": Textbook.- M.: NRNU MEPhI.- 137 p.
4. Catalog of products and services of JSC RASU URL: https://rasu.ru/products/catalog_rasu.pdf (accessed 27.01.2021)

УДК 621.11.25:681.518.5/027.45

Анализ эксплуатационной надежности систем контроля и управления на базе платформы ТПТС-НТ

Н.И. Кузнецова¹, А.С. Матюшенко², Н.В. Серова-Нашева³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹alexanddr4@mail.ru, ²nika100452@gmail.com, ³greydar@mail.ru

Статья поступила 12.04.2021 г.; после доработки 14.04.2021 г.

Аннотация

Для повышения точности, надежности, безопасности и экономичности существующих АСУ ТП необходимо внедрять новые технологии. Одной из таких технологий является платформа ТПТС-НТ. Для этого проанализирована эксплуатационная надежность системы контроля и управления на базе платформы ТПТС-НТ, для анализа которой взята аналогичная система, но на базе платформы УКТС. Для двух систем выполнен анализ надежности оборудования, в аспекте безопасности АЭС. Сравнительный анализ систем, внедренных на АЭС РФ, выполнен по функционально-техническим характеристикам и по уровню надежности.

Ключевые слова: АСУ ТП, ТПТС, ЗИП, надежность, показатели надежности, резервирование, уровень, регулятор.

Analysis of operational reliability of monitoring and control systems based on TPTS-NT platform

N.I. Kuznetsova¹, A.S. Matyushenko², N.V. Serova-Nasheva³Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹alexanddr4@mail.ru, ²nika100452@gmail.com, ³greydar@mail.ru

Received 12.04.2021 y.; received in final form 14.04.2021 y.

Abstract

To improve the accuracy, reliability, safety and efficiency of existing APCS, it is necessary to introduce new technologies. One of these technologies is the platform TPTS-NT. For this, the operational reliability of the monitoring and control system based on the TPTS-NT platform was analyzed, for the analysis of which a similar system was taken, but based on the UKTS platform. For two systems, an analysis of the equipment reliability was carried out in terms of NPP safety. Comparative analysis of systems implemented at Russian NPPs was carried out in terms of functional and technical characteristics and reliability level.

Keywords: APCS, TPTS, spare parts, reliability, reliability indicators, redundancy, level, regulator.

Введение

Общеизвестно, что полезность и эффективность генерирующего оборудования электро- и теплоэнергетических комплексов современных АЭС в значительной степени обусловлены аналогичными характеристиками используемых систем и средств управления различного уровня и назначения, в том числе и автоматизированных

систем управления технологическими процессами.

АСУ ТП – это человеко-машинная система управления, обеспечивающая автоматизированный сбор, обработку и хранение информации, необходимой для оптимизации управления технологическим объектом в соответствии с поставленным заданием.

К числу важнейших факторов полезности и

эффективности АСУ ТП можно отнести их точность, экономичность, сложность и надежность.

Эти факторы органически связаны друг с другом и определяют главное назначение составляющих систему структурных и функциональных компонентов.

Среди важнейших характеристик эффективности функционирования АСУ ТП особое место занимает надежность. Надежность – свойство системы (изделия, объекта) сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность системы выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, ремонтов, хранения и транспортирования.

Как следует из этого определения, поиск методов и путей оценки, анализа и совершенствования характеристик надежности АСУ ТП и их компонентов представляет важную научную и практическую задачу [1].

Проблема надежности систем управления приобретает особое значение из-за большой значимости выполняемых ими функций и высокой цены отказа.

Даже при довольно редких отказах ущерб, вызванный отключением системы управления или ее неправильным срабатыванием, может превысить выгоду, получаемую в периоды ее работоспособного состояния.

В сложных автоматических системах с широким применением электротехнических элементов и элементов электроники, проблема надежности стоит очень остро.

Несмотря на значительные усилия в области повышения надежности АСУ за последние годы, уровень их надежности остается недостаточно высоким и не удовлетворяет все возрастающим требованиям.

Низкая надежность аппаратуры:

- Приводит к значительным простоям АС.
- Удорожает стоимость их эксплуатации.
- Может привести к аварийным ситуациям с тяжелыми последствиями.

Важность проблемы надежности аппаратуры АС промышленных предприятий обуславливается основными тенденциями развития современной техники.

К ним следует отнести основные причины, определяющие повышенное внимание к проблемам надежности:

1. Стремление к увеличению производствен-

ной мощности, приходящейся на один технологический агрегат.

2. Увеличение количества аппаратуры автоматики.
3. Повышение мощности агрегатов.
4. Расширение функций, выполняемых аппаратурой автоматики.
5. Интенсификация производственных процессов усугубляет последствия отказов устройств автоматики.
6. Рост сложности аппаратуры и создание сложных АСУ.
7. Более медленный рост уровня надежности комплектующих элементов по сравнению с ростом числа элементов в аппаратуре.
8. Увеличение важности выполняемых функций.
9. Усложнение условий эксплуатации.

Все отказы имеют причину или совокупность причин своего возникновения.

Можно предсказывать появление отказов, если будут известны причины их возникновения, и, воздействуя на них, с большой вероятностью отказов можно избежать.

Чтобы получить те самые причины, необходимы сведения о процессах, происходящих в аппаратуре, но они не всегда оказываются достаточными. Чтобы такие сведения получить, систематизировать и учесть при проектировании и производстве, необходимы немалое время и немалые средства, которыми создатели систем часто не располагают.

Описание АСУ ТП

АСУ ТП предназначена для контроля и управления всеми технологическими и электротехническими объектами АЭС с целью обеспечения качественной и бесперебойной выработки электроэнергии соблюдения заданного уровня безопасности.

АСУ ТП построена по многоуровневому принципу. Верхний уровень занимает щит управления, следующий — вычислительные комплексы, которые осуществляют анализ данных, последний — локальные подсистемы.

В состав АСУ ТП энергоблока с реактором ВВЭР-1000 входят следующие структурные системы:

- Система управления и защиты реактора.
- Система внутриреакторного контроля.
- Аппаратура контроля нейтронного потока.
- Автоматизированная система управления

турбоустановкой.

- Централизованная информационно-вычислительная система радиационного контроля.
- ИВС в комплекте с УКТС.
- Устройство логического управления.
- Система контроля генератора.
- Система автоматического регулирования на базе аппаратуры «КАСКАД-2», ПТК, микроконтроллеров.

К недостаткам находящимся в эксплуатации АСУ ТП относятся:

- 1) Отсутствие полной унификации технических средств. Вся система управления содержит ряд подсистем и спецсистем, выполняемых организациями различных ведомств на элементно-конструктивной базе общепромышленного применения. Каждая из систем реализуется на своей элементноконструктивной базе. Такое многообразие типов технических средств приводит к аппаратурной избыточности, увеличению затрат на запчасти, обслуживание, особенно в периоды пуска системы.
 - 2) Унифицированный комплекс технических средств размещается централизованно, связь между этой аппаратурой и датчиками, исполнительными механизмами осуществляется проводами, что приводит к большим затратам дефицитной кабельной продукции (около 20 тыс. километров кабеля).
 - 3) Иерархическое распределение по трем уровням функций управления и централизация функции непосредственного управления и обработка в верхнем уровне системы приводят к излишним аппаратурным затратам и снижению надежности системы (поскольку недоиспользуются возможности аппаратуры первого уровня и требуется создание специальных технических средств для реализации управления второго уровня).
 - 4) Недостаточный уровень обеспечения надежности и отказоустойчивости АСУ ТП и безопасности энергоблока. Отказоустойчивость системы обеспечивается за счет введения структурной избыточности и встроенной диагностики средств. Силовая аппаратура управления исполнительными механизмами (магнитные пускатели, реле) применяется без дублирования и без средств диагностики и контроля, что снижает надежность и отказоустойчивость системы управления в целом.
- Указанные выше недостатки существующих

АСУ ТП приводят к значительному возрастанию объема аппаратуры (аппаратура АСУ ТП серийного энергоблока 1000 МВт занимает более 800 шкафов, что в 5-8 раз превышает объем аппаратуры на аналогичном энергоблоке во Франции). Кроме того, растут затраты при пуске и эксплуатации систем и затягиваются сроки вывода энергоблока на проектную мощность.

Описание СКУ на ТПТС

Платформа ТПТС-НТ построена по модульному принципу и позволяет создавать, в зависимости от требований, различные по степени избыточности структуры путем резервирования функционально важных элементов. Структура ТПТС-НТ позволяет легко наращивать объем аппаратуры в системе управления.

Функциональная структура взаимодействия компонентов ТПТС-НТ имеет двухуровневую организацию. На нижнем уровне сбор данных, выдача управляющих воздействий, а также ряд базовых стандартных функций (таких как фильтрация, индивидуальное управление, регулирование) реализуются в станциях ввода-вывода.

СВВ включают в себя набор модулей связи с процессом, обеспечивающих прием и выдачу сигналов, а также выполнение базовых функций автоматизации.

Вся цифровая информация из модулей связи с процессом собирается интерфейсным модулем и передается на высший уровень обработки через локальную шину ENL. Информация, приходящая в станцию ввода-вывода по шине ENL, распределяется теми же ИМ по модулям связи с процессом в соответствии с адресацией.

Связь ИМ и СПМ в пределах СВВ осуществляется по шине ввода-вывода (ШВВ), имеющей радиально-последовательную структуру, обеспечивающую высокую скорость обмена информацией.

Станции ввода-вывода через локальные шины ENL (100 МГц) связаны с процессорами автоматизации.

Процессоры автоматизации выполняют прикладные функции управления и являются программируемыми. Именно ПА выполняют прикладные алгоритмы, функции защит, блокировок, сигнализации, функционально-групповое управление и пр.

ПА связаны друг с другом локальной сетью EN, построенной на технологии Industrial Ethernet 100 МГц.

Связь с верхним уровнем АСУ ТП осуществляется через шлюзы, связывающие шину

ЕН и локальную сеть СВУ.

Общая схема построения системы приведена на рис. 1.

Такая структура обеспечивает удобство обработки данных процесса, т.к. каждый параметр процесса легко доступен каждому ПА.

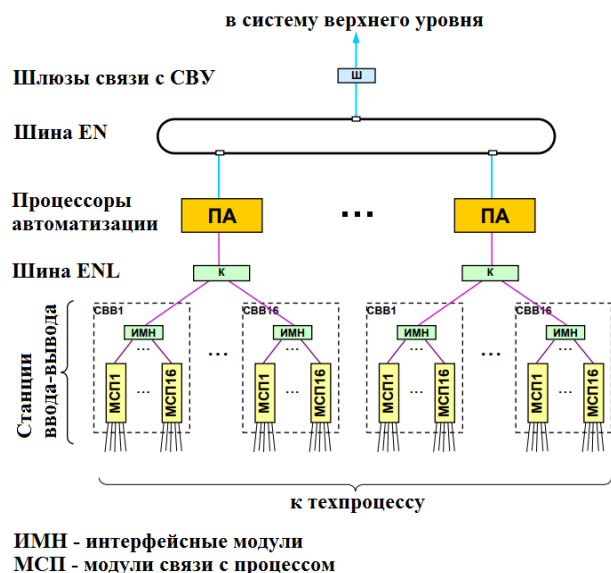


Рис. 1. Общая схема построения системы.

Комплекс средств автоматизации на базе платформы ТПТС-НТ обеспечивает работу в режиме резервирования на всех уровнях, а именно:

- Процессоров автоматизации.
- Шлюзов.
- Интерфейсных модулей.
- Модулей процесса.
- Шины ввода-вывода.
- Шины ЕНЛ.

Процессоры, интерфейсные модули и модули связи с процессом работают по принципу горячего резерва и имеют непосредственные связи «ведущий-ведомый».

Шины питания компонентов ТПТС-НТ также резервированы, причем резервирование осуществляется индивидуально для каждого модуля [2].

Основные характеристики платформы ТПТС-НТ:

- Время реакции системы в пределах 10...100 мс.
- Территориальное распределение аппаратуры по объекту автоматизации.
- Организация местных постов управления.
- Подсоединение любых полевых кабелей сечением от 0,5 до 1,5 мм².
- Малый цикл измерения унифицированных

аналоговых сигналов – до 15 мс.

- Временное разрешение последовательности входных дискретных сигналов – 1 мс.
- Связь с интеллектуальными устройствами по цифровым протоколам.

Преимущества аппаратуры ТПТС-НТ. К основным преимуществам аппаратуры ТПТС-НТ относятся:

- 1) Высокие динамические характеристики, доступность сигналов в любой точке системы.
- 2) Современная шинная система.
- 3) Возможность реализации гибких компоновочных решений, обеспечивающих рациональность применения аппаратуры для автоматизации объектов различных масштабов – от отдельных технологических установок до атомных энергоблоков.
- 4) Разнообразие вариантов конструктивного исполнения: реализация функциональных шкафов с одно- и двухсторонним обслуживанием, организация выносных крейтов.
- 5) Возможность встраивания в оборудование других производителей.
- 6) Возможность построения как распределенной системы сбора информации, так и централизованной.
- 7) Всестороннее резервирование компонентов комплекса.
- 8) Связь с интеллектуальными устройствами по цифровым каналам со стандартными сетевыми протоколами.
- 9) Организация местных постов управления.
- 10) Подсоединение любых полевых кабелей сечением от 0,2 до 2,5 мм².
- 11) Возможность решения локальных задач с ограниченным количеством входных сигналов и повышенными требованиями ко времени реакции.

Расчет запасного имущества и принадлежностей систем

ЗИП – запасное имущество и приборы, прилагаемые к системам и устройствам с целью обеспечения их ремонта в процессе эксплуатации [3].

Выберем одиночный комплект ЗИП – это комплект запасных конструктивных элементов, придаваемых непосредственно изделию в целях обеспечения его надежности при длительном использовании.

Количество запасных частей зависит от интенсивности отказов от времени пополнения ЗИП (тп), требуемой его достаточности (Кд), организации снабжения и степени восстановления.

Для пуассоновского потока отказов вероятность числа отказов n вычисляется по формуле

$$P_n(t) = \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$$

Вероятность того, что число отказов за время t будет не больше m ,

$$P_{n \leq m}(t) = \sum_{n=0}^m \frac{(\lambda t)^n}{n!} e^{-\lambda t}$$

Вероятность того, что число отказов за время t будет больше m ,

Коэффициент достаточности ЗИП обычно задается равным $0,9 - 0,999$. Таким образом, принимая $K_d = 0,99$. Интенсивности отказов элементов системы приведены в таблице 2.1. За время пополнения ЗИП $t_{п}$ принято общее время работы элементов системы, равное 13140 часов.

Далее по формуле $P_{n \leq m}(t)$ определяется K_d для различных значений числа запасных элементов в ЗИП, начиная с $m = 0$ для каждого элемента.

Как только коэффициент достаточности K_d превысит заданный, вычисления оканчиваются и последнее m берется в качестве рассчитанной цифры количества запасных частей рассматриваемого элемента.

В результате расчета общее количество запасных частей для цифрового регулятора равно 5.

На основании данного расчета ЗИП для цифрового регулятора, по аналогии рассчитаем ЗИП для аналогового регулятора.

Таким образом, на период работы системы равной 1,5 года в состав ЗИП-О аналогового регулятора должно входить по 3 запасных блока каждого элемента, т.е. общее количество запасных частей равно 27.

Расчет надежности аналогового регулятора уровня в конденсаторе турбины

Автоматический регулятор уровня обеспечивает поддержание уровня в заданных пределах и изменение уровня в соответствии с заданным законом регулирования. В стационарном режиме регулятор обеспечивает поддержание уровня в заданных пределах с заданной точностью.

Структурная схема регулятора представлена на рис. 2.

Основной регулятор уровня воды в ПГ предназначен для поддержания номинального уровня воды в ПГ при расходах питательной воды от 15-20 до 100 % от номинального значения, пуско-

остановочный регулятор - при расходах питательной воды менее 15-20 %.

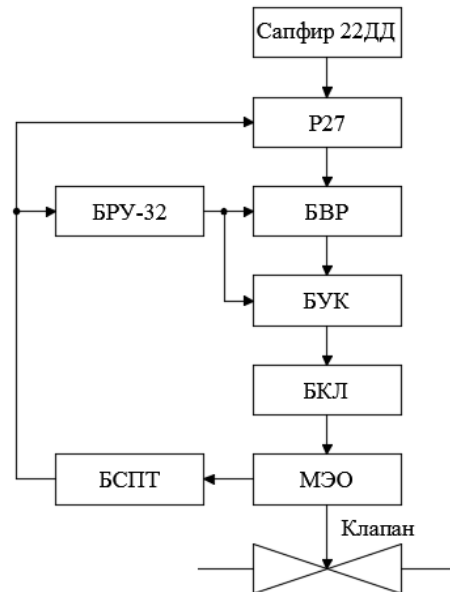


Рис. 2. Структурная схема регулятора

Для данной системы определены следующие показатели надежности.

- 1) Вероятность безотказной работы – это вероятность того, что время T от момента включения аппаратуры до ее отказа будет больше или равно времени t , в течении которого определяется время безотказной работы.

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

где λ – интенсивность отказов;
 t – время работы.

- 2) Вероятность отказа – вероятность того, что при отдельных условиях эксплуатации в заданном интервале времени возникнет хотя бы один отказ.

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

где $P(t)$ – вероятность безотказной работы.

- 3) Интенсивность отказов – условная плотность вероятности возникновения отказа невосстанавливаемого объекта, определяемая для рассматриваемого момента времени при условии, что до этого отказ не возник. Она равна отношению числа отказов изделий в единицу времени к среднему числу изделий исправно работающих в данный отрезок времени.

$$\lambda(t) = \frac{a(t)}{P(t)}$$

где $a(t)$ – частота отказов.

- 4) Средняя наработка до первого отказа – математическое ожидание времени работы изделия до

отказа.

$$T_{CP} = \lambda$$

Для выполнения анализа разработана функционально-логическая схема устройства, которая представляет собой последовательное соединение элементов системы, независимо от их местоположения в структуре системы и взаимосвязи с другими элементами.

Эта схема составлена на основе структурной схемы регулятора уровня в парогенераторе и представлена на рис. 3.

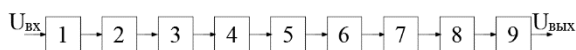


Рис. 3. Функционально-логическая схема аналогового регулятора

1 – Сапфир 22ДД; 2 – Р27; 3 – БВР; 4 – БУК;
5 – БКЛ; 6 – МЭО; 7 – Клапан;
8 – БРУ-32; 9 – БСПТ.

Расчет показателей надежности системы с выполнен с учетом раздельного постоянного резервирования с целой кратностью при четырех резервных элементах.

Для резервирования выбрали четыре отдельных элемента системы, которые имеют наибольшую интенсивность отказов и, следовательно, менее надежны. В данном случае этими элементами являются Р27, БРУ-32, БВР, МЭО.

Схема расчета надежности системы при раздельном постоянном резервировании четырех элементов с целой кратностью, составленная в соответствии с функционально-логической схемой (рис. 3), представлена на рис. 4.

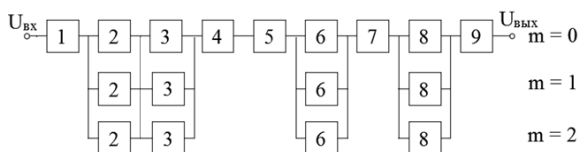


Рис. 4. Схема расчета надежности системы при раздельном постоянном резервировании четырех элементов с целой кратностью

Построим график зависимости вероятности безотказной работы $P_c(t)$ при раздельном постоянном резервировании четырех элементов с целой кратностью от $\lambda_0 t$ при различных значениях m , который представлен на рис. 5.

Расчет надежности цифрового регулятора уровня в конденсаторе турбины

Уровень в конденсаторе регулируется, как

правило, регуляторами, которые получают основной сигнал по уровню и сигнал обратной связи от измерительного преобразователя перемещения исполнительного механизма. Регуляторы уровня в конденсаторе воздействуют на сливные клапаны. При повышении уровня в конденсаторе клапан открывается. В связи с принятой структурой регуляторов уровня они осуществляют пропорциональное регулирование, при котором в установившемся состоянии каждому значению уровня соответствует определенное открытие регулирующего клапана.

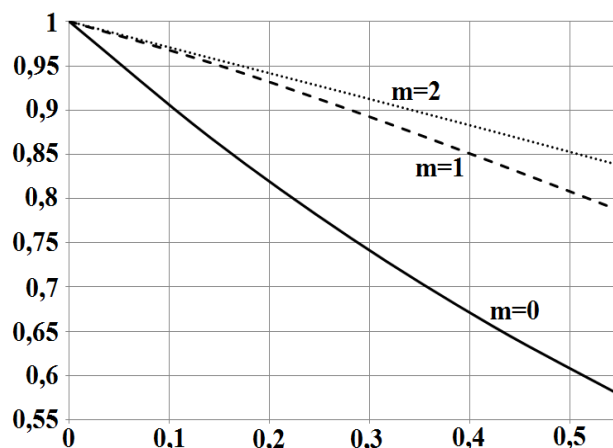


Рис. 5. График зависимости вероятности безотказной работы $P_c(t)$ при раздельном постоянном резервировании четырех элементов с целой кратностью от $\lambda_0 t$ при различных значениях m

Регуляторы уровня в конденсаторе турбины (UA 11,12C02) предназначены для поддержания уровня конденсата в конденсаторе турбины равным заданному значению.

Структурная схема регулятора представлена на рис. 6.

Регулятор поддерживает уровень в конденсаторе турбины, установленный на момент включения регулятора, но не менее (1150 ± 50) мм.

Регуляторы отключаются при наличии любого из условий:

- Отказ измерения уровня в конденсаторе (трехканальное измерение) – отключение обоих регуляторов.
- Потере питания ИМ соответствующего РК с выдержкой времени 2с – отключение соответствующего регулятора.

Условия работоспособности системы. Работоспособность – это способность выполнять все заданные функции с сохранением параметров в

требуемых пределах.

Условия работоспособности АД:

- Рабочий диапазон температур — до $+105^{\circ}\text{C}$
- Условия работоспособности ТПТС:
- Рабочий диапазон температур (УХЛ4 по ГОСТ 15150-69) — от $+1$ до $+40^{\circ}\text{C}$.
- Сейсмостойкость по шкале MSK64 по Гост 30546.1 (над нулевой отметкой 35м) — 8 баллов.

Условия работоспособности НКУ:

- Высота над уровнем моря не более 2000 м.
- Предельное значение температуры окружающего воздуха от 1 до 40°C .
- Относительная влажность окружающего воздуха до 80% при температуре 25°C .

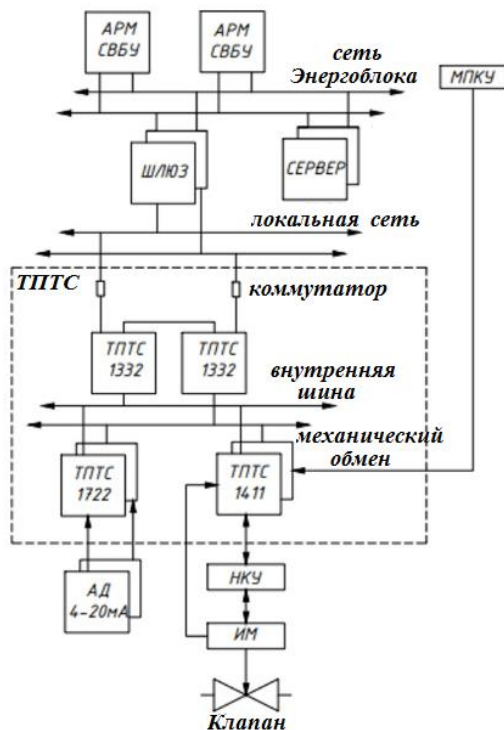
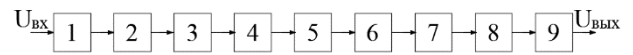


Рис. 6. Структурная схема регулятора уровня в конденсаторе турбины

Основные блоки, формирующие закон регулирования, находятся в отдельных помещениях или включены в состав шкафов УКТС. Влияние окружающей среды на регулятор минимально и им можно пренебречь. При работе влажность не должна превышать 60%. Диапазон рабочих температур регулятора находится в пределах $20^{\circ}\text{C} \div 180^{\circ}\text{C}$. Электропитание функциональных модулей осуществляется от источника питания напряжением $+24\text{ В}$. Каждый модуль имеет собственный встроенный блок питания.

По структурной схеме регулятора уровня в

конденсаторе турбины составлена функционально-логическая схема, представленная на рис. 7.



1, 2 – АД; 3, 4 – ТПТС-1722; 5, 6 – ТПТС-1411;
7 – НКУ; 8 – ИМ; 9 – UA(11, 12)S02

Рис. 7. Функционально-логическая схема регулятора уровня в конденсаторе турбины

Для резервирования выбираем четыре отдельных элемента системы, которые имеют наибольшую интенсивность отказов и, следовательно, менее надежны. В данном случае этими элементами являются два АД, ИМ и НКУ.

Схема расчета надежности системы при раздельном постоянном резервировании четырех элементов с целой кратностью, составленная в соответствии с функционально-логической схемой (рис. 7), представлена на рис. 8.

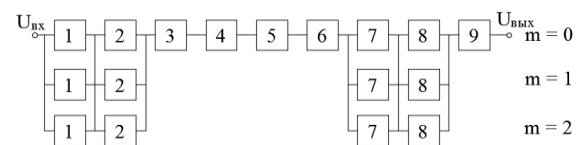


Рис. 8. Схема расчета надежности системы при раздельном постоянном резервировании четырех элементов с целой кратностью

Построим график зависимости вероятности безотказной работы $P_c(t)$ при раздельном постоянном резервировании четырех элементов с целой кратностью от $\lambda_0 t$ при различных значениях m , который представлен на рис. 9.

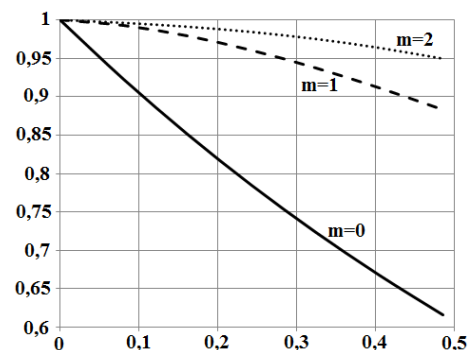


Рис. 9. График зависимости вероятности безотказной работы $P_c(t)$ при раздельном постоянном резервировании четырех элементов с целой кратностью от $\lambda_0 t$ при различных значениях m

Сравнительный анализ регуляторов уровня в конденсаторе турбины

Сравнительные характеристики регуляторов представлены ниже.

Функционально-технические характеристики аналогового регулятора:

- Связь между элементами организуется с помощью кабельных линий, что влечет за собой временные задержки, которые превышают требуемые показатели и большие экономические затраты.
- Существующие ИВС в полной мере не обеспечивают непрерывного режима работы и обладают малой эксплуатационной надежностью, отказоустойчивостью и безопасностью.
- Лишь небольшая часть аналоговых сигналов преобразовывается и хранится в цифровом виде. Наиболее важная информация снимается самописцами и операторами-технологами, в связи с этим существует вероятность некорректной трактовки показаний приборов.
- Сбор информации от технических средств в аналоговых системах происходит централизованно.

Функционально-технические характеристики цифрового регулятора:

- Возможность построения различной структуры системы сбора информации. Доступ к требуемому сигналу можно получить в любой точке системы, что позволяет решать задачи с повышенными требованиями ко времени реакции.
- Большая часть элементов системы программируема, вследствие этого предсказуемость работы системы увеличивается, а ремонтнопригодность улучшается.
- Вся информация сохраняется в цифровом виде, что позволяет анализировать состояние оборудования, делать прогнозы по работе оборудования. Хранение цифровой информации уменьшает количество ошибок, связанных с человеческим фактором, а, соответственно, растет точность, надежность и безопасность.
- Сбор информации может быть как централизованным, так и распределенным с организацией местных постов управления.

График сравнения надежности двух систем

представлен на рис. 10.

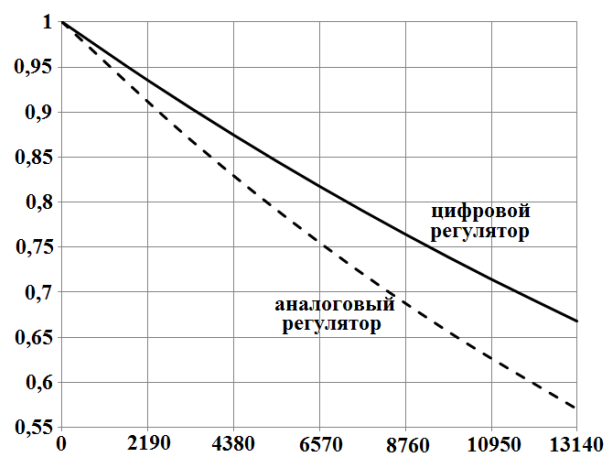


Рис. 10. График сравнения ВБР двух систем

Исходя из графика можно сделать вывод, что ВБР СКУ на базе ТПТС в сравнении с ВБР аналогового регулятора на рассматриваемом участке 13140 часов больше. Это связано с тем, что качество, а, следовательно, надежность современного оборудования значительно выше. Высокие показатели надежности характеризуются малым количеством отказов и отклонений от работоспособного состояния.

Заключение

Для выполнения анализа описаны базовые системы СКУ АЭС. Для решения некоторых проблем текущих АСУ ТП, рассмотрены достоинства применения платформы ТПТС-НТ, в качестве базы системы контроля и управления. На основе этого рассмотрены две системы регулирования уровня в конденсаторе турбины, в основе которых старое и новое оборудование, а именно УКТС и ТПТС соответственно. Определены показатели надежности функционально-логических схем, с применением метода повышения надёжности – резервирования. Представлен сравнительный анализ систем по функционально-техническим характеристикам и по уровню надежности.

Произведенный сравнительный анализ показывает, что система на базе платформы ТПТС-НТ значительно превосходит систему на базе УКТС, как по функционально-техническим характеристикам, так и по уровню надежности. Это означает безопасную и эффективную экс-

платацию оборудования СКУ АЭС, при применении современных ПТК.

Список литературы

1. Мезин С.В. Разработка методики анализа показателей надежности современных АСУ ТП ТЭС и АЭС: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.07. - Московский Энергетический Институт, Москва, 2000 – 107 с.
2. Описание платформы ТПТС-НТ [Электронный ресурс] URL: https://rasu.ru/products/catalog_rasu.pdf. (дата обращения 27.01.2021)
3. Интенсивность отказов элементов справочник [Электронный ресурс] URL: <https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik/>. (дата обращения 27.01.2021)

References

1. Mezin S.V. *Razrabotka metodiki analiza pokazatelej nadezhnosti sovremennyh ASU TP TES i AES* [Development of a methodology for analyzing reliability indicators of modern APCS TPP and NPP] Thesis, MPE Institute, Moscow, 2000, 107p.
2. Description of the TPTS-NT platform [Electronic resource] URL: https://rasu.ru/products/catalog_rasu.pdf. (accessed 27.01.2021)
3. Failure rate of elements reference [Electronic resource] URL: <https://areliability.com/intensivnost-otkazov-elementov-spravochnik/>. (accessed 27.01.2021)

УДК 621.11.25:681.518.5/027.45

Анализ и оценка работоспособности основных элементов при диагностировании СКУ АЭС

Н.И. Кузнецова¹, Д.А. Мельник², В.А. Нурзай³

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹nika100452@gmail.com, ²median16@mail.ru, ³Mengsk777@yandex.ru

Статья поступила 21.04.2021 г.; после доработки 23.04.2021 г.

Аннотация

В данной статье оценена работоспособность основных элементов при диагностировании СКУ, а также произведен сравнительный анализ работоспособности и эффективности блоков двух ПТК – УКТС и ТПТС в условиях реальной эксплуатации на АЭС. Рассмотрено программное обеспечение комплекса типовых программно-технических средств при диагностировании и самодиагностировании функциональных модулей ТПТС.

Ключевые слова: автоматизация, УКТС, ТПТС, программное обеспечение, диагностирование, СКУ АЭС.

Analysis and evaluation of the working capacity of the main elements during NPP's CMS diagnosing

N.I. Kuznetsova¹, D.A. Melnik², V.A. Nurzai³

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹nika100452@gmail.com, ²median16@mail.ru, ³Mengsk777@yandex.ru

Received 21.04.2021 y.; received in final form 23.04.2021 y.

Abstract

There was an evaluation of the working capacity of the main elements during COS diagnosing in this article. And comparative analysis of the working capacity and efficiency the two PTK – UCTS and TPTS was produced in the real NPP's exploitation conditions. The software of the typical software and hardware's complex during diagnosing and self-diagnosing of the TPTS's functional modules were reviewed.

Keywords: automation, UCTS, TPTS, software, diagnosing, NPP's COS.

Введение

Во всем мире наблюдается динамическое развитие атомных энергетических систем за счет новых технологий, развивающихся ускоренными темпами. На данный момент ни один технологический процесс не обходится без применения автоматизированных систем. Это связано с тем, что все процессы и системы усложняются и человек, без помощи автоматики не в состоянии обеспечить их работу.

С помощью СКУ производятся различные измерения с последующей обработкой, контроль и регулирование большого количества парамет-

ров, что позволяет объекту выполнять возложенные на него функции. Современная атомная электростанция является сложным высокотехнологичным объектом. Управлять подобным объектом невозможно без современных средств автоматизации и вычислительной техники, без высокоэффективных систем контроля и управления.

Своевременное выявление отказов, дефектов и неправильного функционирования оборудования СКУ является одной из важнейших составляющих его надежной эксплуатации. Для этого производится постоянный контроль и диагностирование технического состояния объектов

СКУ.

Благодаря проведению технического обслуживания и диагностированию, оборудование СКУ может гораздо большее время сохранять работоспособное состояние, то есть такое состояние, при котором оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Целью данной статьи является на основе информации об АСУ ТП, эксплуатируемых на энергоблоках АЭС проанализировать существующие системы диагностирования АСУ ТП и осветить основные способы оценки работоспособности основных элементов при диагностировании СКУ АЭС.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Произвести сбор и изучить информацию об используемых системах диагностирования АСУ ТП АЭС.
- Произвести оценку работоспособности основных элементов при диагностировании СКУ АЭС и произвести их сравнительный анализ.
- Обобщить результаты полученного сравнительного анализа, рассмотреть их влияние на повышение надежности и безопасности СКУ при эксплуатации энергоблока.

Диагностирование оборудования на ядерных энергоблоках

Основная цель диагностики ЯЭБ – повышение эксплуатационной безопасности и надежности на основе выработки (при участии оператора) управляющих воздействий, адекватных техническому состоянию энергоблока.

Достижением общей цели диагностики ЯЭБ осуществляется путем выполнения следующих задач:

1. Оценка текущего состояния ЯЭБ.

Она производится по шести видам технического состояния:

- исправное;
- неисправное;
- работоспособное;
- неработоспособное;
- состояние правильного функционирования;
- состояние неправильного функционирования.

2. Поиск дефектов.

Под дефектом понимают любые причины,

кроме действий оператора и внешних воздействий, приводящие к отклонению технического состояния энергоблока от исправного. Цель своевременного обнаружения дефекта – найти оптимальный способ возвращения энергоблока в исправное состояние или способ минимизации последствий аварии.

3. Возможность более раннего обнаружения аномалий.

То есть на такой стадии, на которой они еще не нарушают правильности функционирования энергоблока.

4. Прогнозирование технического состояния, в котором окажется энергоблок в некоторый будущий момент времени.

Решение этой задачи и ее реализация техническими средствами позволяют прогнозировать динамику развития образующегося дефекта и наступление отказа элемента оборудования.

5. Информационная поддержка операторов диагностической информацией заключается в:

- обеспечении возможности быстрого анализа сложившейся ситуации, на основании которого оператор принимает решение по управлению;
- определении (на основе совета) действий, необходимых для правильного ведения технологического процесса;
- контроле действий самого оператора.

6. Самодиагностика.

Заключается в получении однозначного и достоверного ответа на вопрос о состоянии самой диагностической системы, поскольку ее программные и технические средства не являются абсолютно надежными.

7. Отображение диагностической информации состоит:

- в организации оптимального распределения информации между операторами, т.е. предоставление каждому оператору только тех сообщений, которые способны вызывать его ответные действия;
- в разработке форм представления диагностической информации, в виде легкодоступных для восприятия операторов блочного щита управления (БЩУ), видеопрограмм, включая конкретные указания по последовательности управляющих воздействий в

той или иной ситуации.

В статье рассмотрена работоспособность, и эффективность блоков двух комплексов ПТК – УКТС в условиях реальной эксплуатации на АЭС, для выполнения сравнительного анализа и оценки надежности оборудования.

Блок управления регулирующим клапаном УКТС

Блок управления регулирующим клапаном (БУК) предназначен для управления электродвигателем клапана. Он выдает информацию о положении клапана, формирует команды «Открыть»/«Закрыть», технологические защиты, а также имеет сигнализации на лицевой панели.

БУК позволяет реализовать следующие функции:

- 1) Управлять электродвигателем клапана из крайних и промежуточного положений.
- 2) Останавливать клапан в промежуточном положении.
- 3) Открывать/закрывать регулирующий клапан под действием автоматических команд регулятора, УЛУ, дистанционного управления при помощи индивидуальных ключей на БЩУ или через систему избирательного управления (ИСУ), устройств защит и блокировок, а также при помощи кнопок, установленных на лицевой панели блока.
- 4) Выполнять приоритет команд от технологических защит (ТЗ) перед всеми остальными командами.
- 5) Запрещать выполнять команды дистанционного открытия/закрытия.
- 6) Формировать запрет команд «Открыть»/«Закрыть».
- 7) Сигнализировать положение регулирующего клапана с помощью двух светодиодов на лицевой панели блока.
- 8) Сигнализировать о наличии на входах команд и их запретов с помощью четырех светодиодов на лицевой панели блока (только БУК- М).
- 9) Выдавать информацию в УЛУ и технологические защиты.
- 10) Формировать сигнал «Память»

Основными частями блока управления клапаном являются два канала, формирующие команды «Открыть» и «Закрыть», а также имеются еще два вспомогательных элемента, которые позволяют реализовать функцию «Память» и сформировать информационный сигнал, что ре-

гулирующий клапан находится в промежуточном положении.

Описание модуля ТПТС 55.1673

В комплексе средств автоматизации ТПТС осуществление необходимых алгоритмов работы системы выполняется функциональными модулями, которые можно программировать благодаря наличию микропроцессора и развитого аппаратного интерфейса ввода/вывода сигналов. Основной спецификой функциональных модулей системы ТПТС является наличие в их постоянной памяти (FEPROM) набора готовых подпрограмм, для выполнения так называемых базовых функций, арифметических и логических, а также специально разработанных для решения специфических задач, встречающихся на электростанциях, - функция измерения, функция управления клапаном, двигателем, задвижкой, функция коррекции, функция регулирования и т.п.).

Все типы модулей, входящих в состав комплекса типовых программно-технических средств, разделяют на группы по функциональной ориентированности:

- Измерительные модули.
- Модули сбора и обработки аналоговых и дискретных сигналов.
- Модули индивидуального управления исполнительными механизмами.
- Модули группового и подгруппового управления.
- Модули регуляторы.

Например, модуль ТПТС 55.1673, функциональная схема которого показана на рис.1, специально разработан для индивидуального управления несколькими исполнительными механизмами и является наиболее часто встречающимся в системах контроля и управления построенных на базе ТПТС.

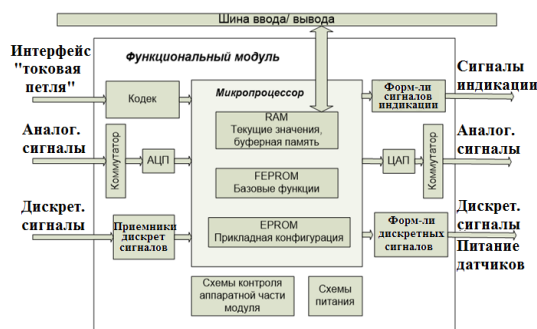


Рис. 1. Функциональная схема модуля ТПТС 55.1673

Один такой модуль выполняет следующие функции:

- автоматическое управление одновременно до четырех исполнительных механизмов по определённому алгоритму;
- автоматизированное управление исполнительными механизмами с рабочей станции оператора с отображением информации о состоянии оборудования на экране;
- дистанционное управление со щита посредством ключей;
- сигнализация состояния оборудования на средствах индикации ЩУ;
- связь с другими функциональными модулями через шину ввода/вывода или через шину процесса для образования сложных контуров управления.
- самодиагностика, диагностика линий связи и контролируемого технологического оборудования.

Конфигурирование ТПТС

Конфигурированием называется процесс настройки модуля на определенный алгоритм функционирования. Оно производится методом ввода в ППЗУ (EEPROM) двоичной таблицы, в которой прикладной алгоритм выражен в виде схем соединения базовых функций и заданных значений для параметризуемых функций.

Процесс конфигурирования модулей производится с помощью системы конфигурирования GET-R.

Требуемая конфигурация задается в виде простой схемы из базовых функций, благодаря графическому языку системы. В библиотеках хранятся образы и логика базовых функций. Оттуда они вызываются на экран из отдельных для каждого модуля меню.

Такой способ конфигурирования позволяет пользователям быстро и с малой вероятностью ошибки задать нужный алгоритм функционирования, так как является достаточно наглядным и удобным, даже для людей, не владеющих навыками программирования.

В результате конфигурирования формируются три вида информации:

- схема соединения базовых функций прикладного алгоритма в графическом представлении
- таблица конфигурации (таблица соединения и параметрирования) базовых функций в

текстовом представлении

- бинарное представление таблицы конфигурации.

Программное обеспечение ТПТС

Программное обеспечение ТПТС состоит из следующих компонентов:

- 1) внутреннее ПО;
- 2) инструментальное ПО.

Внутреннее ПО состоит из следующих компонентов:

- 1) базового программного обеспечения;
- 2) прикладного ПО.

В состав базового программного обеспечения входят следующие стандартные программы:

- стандартные системные программы, реализующие функции управления системой и передачи информации в реальном масштабе времени;
- стандартные программные блоки (программные блоки функциональных модулей и интерфейсные блоки УИ), реализующие элементарные функции управления и обработки информации.

Стандартные системные программы выполняют следующие функции:

- 1) управление резервированием;
- 2) обработка сигналов прерывания в модуле EAS;
- 3) ведение единого времени;
- 4) реализация сетевых протоколов, передача и обмен информацией
- 5) формирование сигналов прерывания в функциональных модулях;
- 6) диагностика технических и программных средств.

Оборудование для конфигурирования функциональных модулей

Инженерная станция. Инженерная станция предназначена для разработки, документирования, корректировки, сохранения и загрузки прикладных алгоритмов для ПТК, построенных на базе ТПТС на этапах наладки и работ, связанных с заменой программного обеспечения или самих модулей.

Система конфигурирования позволяет:

- создавать схемы соединений и функционально-логические схемы, описывающие алгоритм функционирования модуля, с по-

мощью встроенного графического редактора;

- формировать и загружать в модули загрузочные файлы;
- контролировать проведение изменений;
- формировать списки сигналов, телеграмм, операндов и т.п., упорядоченные по различным признакам;
- определять несоответствия между программными конфигурациями, загруженными в модули и хранящимися в системе GET-R;
- сохранять и копировать проектные данные;
- обеспечить защиту от несанкционированного доступа при помощи системы паролей и разграничения прав доступа к проектным данным для разных категорий пользователей.

Программатор. Программатор типа ТПТС54.3310 представляет собой вспомогательное средство конфигурирования ФМ, которое используется при наладке ПТК и настройки отдельных параметров системы, таких, например, как параметры регуляторов. После подтверждения правильности внесенных в схемы или параметры изменений, при помощи инженерной станции они вносятся в конфигурацию системы, а также оформляется соответствующая документация.

Сравнительный анализ УКТС БУК и ТПТС 55.1673

На современных российских атомных электростанциях устаревшие блоки УКТС заменяют более новыми модулями ТПТС. Главными причинами замен является то, что блоки УКТС имеют узкую специализацию, в них отсутствует цифровая обработка сигналов и функция самодиагностирования. В условиях применения новейшего оборудования скорость обработки данных блоков УКТС недостаточна, в них нет необходимых интерфейсов, а соответственно связи с ПК и надлежащего программного обеспечения.

Основными преимуществами модуля ТПТС 55.1673 перед блоком управления клапаном УКТС является:

- использование более современной элементной базы;
- возможность управления до 4 различных механизмов одним модулем, а также связь с другими ФМ для образования сложных контуров управления;
- уменьшение количества элементов, соединений и составных частей, что повышает

безотказность, долговечность, работоспособность и другие критерии надежности;

- более высокая скорость обработки и передачи данных;
- компактность (за счет перечисленных выше свойств каждая стойка ТПТС, состоящая из подобных функциональных модулей, эквивалентна 3-5 стойкам аппаратуры, выполненной по традиционным технологиям);
- наличие функции самодиагностики и диагностики линий связи и контролируемого технологического оборудования, что также увеличивает надежность и повышает удобство пользования модулем;
- большой набор сервисных средств (инженерная станция, диагностическая станция, имитаторы технологического оборудования и др.);
- наличие современных интерфейсов, таких как витая пара (RS-485, Ethernet), USB, шины EN, ENL и шины ввода/вывода (ШВВ);
- возможность подключения к ПК для проведения тестового и функционального диагностирования, а также реконфигурации;
- последнее показывает возможность замены одного функционального модуля любым другим, после изменения его программ и алгоритмов работы, без изменения функционирования первоначальной системы.

УКТС БУК имеет широкое распространение и зарекомендовал себя на многих станциях. Однако модуль ТПТС 55.1673 имеет ряд преимуществ, благодаря которым его использование является более целесообразным на современных энергетических объектах и других производствах.

Заключение

В данной статье рассмотрены методы и алгоритмы диагностирования технических систем, описано применение диагностирования в оборудовании и системах ЯЭУ.

Приведено описание двух ПТК: старого образца, на примере блока управления регулирующим клапаном унифицированного комплекса технических средств, и новое поколение – модуль ТПТС 55.1673.

Для обеих систем описаны принципы их работы.

Проведен их сравнительный анализ, а также описано программное обеспечение и оборудование для конфигурирования комплекса ТПТС при всех режимах эксплуатации, в том числе оценке

работоспособности при проведении диагностики.

Сравнительный анализ показывает, что модуль ТПТС 55.1673 значительно превосходит блок УКТС БУК, как по функционально-техническим характеристикам, так и по диагностическим возможностям. Это означает безопасную и эффективную эксплуатацию оборудования СКУ АЭС, при применении современных ПТК.

Список литературы

1. «Унифицированный комплекс технических средств (УКТС)». Методическое пособие. Служба подготовки персонала Балаковской АЭС.
2. «Программно-технические средства лабораторного практикума “ПТК АСУТП АЭС”». Методические указания по лабораторному практикуму.
3. Артемьев К. «Комплекс средств автоматизации ТПТС для построения систем нормальной эксплуатации и систем безопасности АЭС». ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова»
4. Аникевич К.П. Автоматическое регулирование технологических параметров. — Севастополь: СКУАЭП. — 2008. — 336 с.
5. Аникевич К.П. Системы управления и защиты реактора ВВЭР-1000. Учебное пособие. Севастополь: СКУАЭП, 2006.

References

1. *Unificirovaniy complex tehnikeskih sredstv.*[Unified set of technical means] Toolkit. Balakovskaya NPP's personnel training service.
2. *Programmno-tehnicheskie sredstva laboratornogo praktikuma “PTC ASUTP AES”.*[Software and hardware for laboratory practice] Methodological instructions for laboratory practice.
3. Artemyev K. *Komplex sredstv avtomatisatsii TPTS dlya postroyeniya system normalnoi expluatacii i system bezopasnosty AES.* [Complex of standard software and hardware automation tools for building normal operation systems and NPP safety systems] FSUE “VNIIA im. N.L. Duhova”
4. Anikevich K.P. *Avtomaticheskoe regulirovanie tehnologicheskikh parametrov* [Automatic regulation of technological parameters] – Sevastopol: SNUNEI – 2008 – 336p.
5. Anikevich K.P. *Systemy upravleniya i zashity reaktora VVER-1000.*[PWPR-1000 reactor control and protection systems] Tutorial. Sevastopol: SNUNEI, 2006.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.382

Область применения MOSFET, IGBT, SiC, GaN

И.А. Кочетов¹, Н.В. Омельченко²*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹kochetov.vano@mail.com, ²nvomelchenko@mail.ru*

Статья поступила 02.04.2021 г.; после доработки 07.04.2021 г.

Аннотация

На сегодняшний день силовые транзисторы IGBT и MOSFET стали основными элементами, применяемыми в мощных импульсных преобразователях, но сейчас полупроводники должны лучше соответствовать строгим требованиям, поэтому для решения этой проблемы применяются сложные полупроводниковые устройства - это карбид-кремниевые транзисторы (SiC) и галлий-нитридные (GaN).

Ключевые слова: IGBT, MOSFET, SiC, GaN, транзисторы, низковольтные высокочастотные DC/DC-конверторы, силовые транзисторные ключи.

Scope of MOSFET, IGBT, SiC, GaN

I.A. Kochetov¹, N.V. Omel'chenko²*FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia. ¹kochetov.vano@mail.com, ²nvomelchenko@mail.ru*

Received 02.04.2021; received in final form 07.04.2021.

Abstract

To date, IGBT and MOSFET power transistors have become the main elements used in high-power pulse converters, but now semiconductors need to better meet strict requirements, so complex semiconductor devices are used to solve this problem - these are silicon carbide transistors (SiC) and gallium nitride transistors (GaN).

Keywords: IGBT, MOSFET, SiC, GaN, transistors, low-voltage high-frequency DC / DC Converter, power transistor keys.

Введение

На сегодняшний день в силовой электронике пока что не существуют такие устройства, которые развиваются настолько стремительно и имеющие множество аналогичных характеристик, как биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT), а также мощные переключательные полевые транзисторы с изолированным затвором (MOSFET).

На протяжении десятилетий кремний доминировал в мире транзисторов. Но это постепенно меняется. Были разработаны составные полупроводники из двух или трех материалов, которые обладают уникальными преимуществами и превосходными характеристиками. Например,

составные полупроводники дали нам светоизлучающий диод (LED). Один тип состоит из смеси арсенида галлия (GaAs) и арсенида галлия и фосфора (GaAsP). Другие используют индий и фосфор.

Проблема в том, что сложные полупроводники труднее производить и дороже. Тем не менее, они предлагают значительные преимущества по сравнению с кремнием. Новые более требовательные приложения, такие как автомобильные электрические системы и электромобили, обнаруживают, что составные полупроводники лучше соответствуют их строгим требованиям.

Два таких сложных полупроводниковых устройства, которые появились как решения - это силовые транзисторы: карбид-кремниевые

(SiC) и галлий-нитридные (GaN) транзисторы. Первые (SiC) как раз обладают высокими рабочими напряжениями (900...1500 В), низкими задержками на переключение и высокой допустимой частотой переключения (100...250 кГц в режиме жесткого переключения). Применение SiC транзисторов в тех же режимах, что и MOSFET позволяет работать со значительно большими напряжениями (до 1000...1200 В) [6].

Постановка задачи

Целью данной статьи является анализ перспективных решений по выбору и рассмотрению особенности силового ключа для определенных типовых, наиболее распространенных схем включения и краткий обзор сравнительных характеристик элементов.

Преимущества и недостатки полупроводников

С целью низковольтного высокочастотного DC/DC-конвертора по большей части будут применять MOSFET. Однако в области высоких напряжений (более 300 В) и частот (25...125 кГц) выбор оптимального элемента представляет собой существенную проблему. Неправильный выбор элементов может повлечь за собой то, что устройство не сможет выполнить свои функции, будет рассеивать значимую мощность, что приведет к неконкурентоспособности.

Биполярные транзисторы (БТ) представляют преимущественно простыми и дешевыми в производстве, снабжающие при этом хорошие переключательные характеристики: довольно высокое блокируемое напряжение (несколько сотен вольт, вплоть до 1500...2000 В), маленькое падение напряжения в проводящем состоянии, приемлемые быстродействие и коммутационные потери при условии оптимальной глубины насыщения. Вследствие этого БТ считаются первыми силовыми транзисторными ключами (СТК), получившими массовое применение в энергетической электронике [5].

Кроме того, имеет большое значение не только выбор типа элемента - IGBT или MOSFET. А также нужно выбрать и изготовителя, притом, что на рынке силовых полупроводников существует жесткая конкуренция. В отдельных ситуациях с трудом отдается предпочтение кому-либо из производителей, чем определить подходящий элемент.

Общим у IGBT и MOSFET является изолированный затвор, по этой причине данные элементы обладают схожими характеристиками управления. В результате отрицательного температурного коэффициента тока короткого замыкания появилась особенность создавать транзисторы, устойчивые к короткому замыканию. В настоящее время транзисторы с нормированным временем перегрузки по току выпускаются практически всеми ведущими фирмами.

Отсутствие тока управления в статических режимах позволяет отказаться от схем управления на дискретных элементах и создать интегральные схемы управления — драйверы. За исключением обеспечения тока затвора, они имеют возможность выполнять и ряд вспомогательных функций, таких как защита от перегрузки по току, короткого замыкания и падения напряжения управления.

Для важных элементов с управляющим затвором падение напряжения управления представляется опасным состоянием. В то же время транзистор может перейти в линейный режим и выйти из строя из-за перегрева кристалла.

MOSFET в качестве СТК имеет свои отличительные множественные положительные особенности: быстрота переключения, сравнительно большой пиковый ток, простота управления, широкая, практически прямоугольная область безопасной работы, стойкость к лавинному пробое и быстрому нарастанию напряжения на приборе [4].

Эти преимущества, свойственные полупроводникам на основных носителях, немного обесцениваются их скромными характеристиками в проводящем состоянии, которые при этом в значительной степени ухудшаются при увеличении класса СТК по блокируемому напряжению, а также — с ростом температуры кристалла. В свою очередь один из существующих недостатков MOSFET — это низкие характеристики обратного восстановления паразитного диода, встроенного в его структуру, что позволяет быть критичным в тех схемах применения и режимах работы, где этот диод проводит ток, а затем резко выключается [3].

Свойства этого диода заметно ухудшаются с ростом температуры кристалла, кроме этого при увеличении класса СТК по блокируемому напряжению. На рисунке 1 схематически показан поперечный разрез кристалла классического MOSFET (вертикальный, с двойной диффузией).



Рис. 1. Поперечный разрез кристалла классического MOSFET (вертикальный, с двойной диффузией)

В настоящее время представлено, вдобавок испытаны различные технические решения, призванные снизить недостатки MOSFET, сохранив, по возможности, их лучшие качества, т.е. объединить в одном СТК сильные стороны приборов на основных и неосновных носителях. В особенности успешным оказался биполярный транзистор с изолированным затвором (IGBT), поперечный разрез которого изображен на рисунке 2.



Рис. 2. Поперечный разрез кристалла биполярного транзистора с изолированным затвором (IGBT)

Сравнивая рисунки 1 и 2, видим, что в структуре IGBT имеется дополнительная P+ область и, соответственно, еще один P-N-переход.

Ток MOSFET-структуры в составе IGBT являются управляющим (током базы) для биполярного PNP-транзистора. Являясь приборами на неосновных носителях, IGBT обладают превосходными характеристиками в проводящем состоянии, которые, несмотря на отличия от MOSFET, не так зависят от температуры кристалла и класса СТК по блокируемому напряжению. При этом IGBT сохраняют и многие достоинства, характерные для MOSFET: простоту управления, широкую ОБР и очень большой допустимый ток [10].

Во всех отношениях, по скорости переключения и стойкости при перегрузках IGBT уступают MOSFET, но изменение в конструкции и технологии изготовления IGBT позволило значительно уменьшить этот разрыв. Отсутствие в структуре IGBT встроенного обратного диода даёт возможность пользователю произвести выбор между применением внешнего диода с быстрым восстановлением, имеющим оптимальные для данной задачи характеристики или использованием «CO-PACK»-прибора, т.е. размещенных в одном корпусе кристаллов IGBT и антипараллельного диода.

Карбид-кремниевые транзисторы (SiC)

SiC-транзисторы представляют собой полевые МОП-транзисторы с электронным режимом работы. Эти устройства могут переключаться на частотах до 1 МГц при уровнях напряжения и тока, намного превышающих кремниевые полевые МОП-транзисторы. Максимальное напряжение сток-исток составляет примерно до 1800 В при допустимом токе до 100 ампер. Кроме того, сопротивление SiC-устройств в открытом состоянии намного ниже, чем у кремниевых МОП-транзисторов, что делает их более эффективными во всех приложениях с импульсным питанием (конструкции SMPS). Одним из ключевых недостатков является то, что для них требуется более высокое напряжение управления затвором, чем для других полевых МОП-транзисторов, хотя это положение меняется по мере совершенствования конструкции. Устройствам SiC требуется от 18 до 20 В напряжения затвора для включения устройства с низким сопротивлением в открытом состоянии. Стандартным кремниевым МОП-транзисторам требуется напряжение затвора менее 10 вольт для полной проводимости (рисунок 3). Кроме того, устройствам SiC требуется привод затвора от –3 до –5 В для переключения в выключенное состояние. Однако для

удовлетворения этой потребности были разработаны специальные ИС управления затвором. SiC, как правило, дороже, чем другие альтернативы, но их способность к работе с высоким напряжением и током делает их хорошо подходящими для автомобильных силовых цепей.

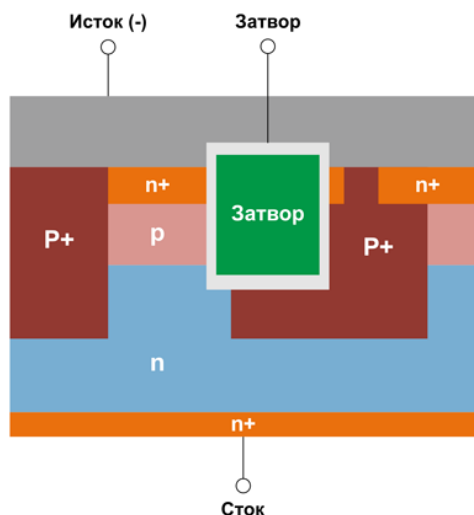


Рис. 3. Поперечный разрез кристалла карбид-кремневые транзисторы (SiC)

Галлий-нитридные транзисторы (GaN)

Транзисторы на основе GaN рано заняли нишу в области радиочастотной (РЧ) мощности. Природа материалов привела к разработке полевого транзистора (FET) с режимом истощения. Полевые транзисторы, называемые псевдоморфным транзистором с высокой подвижностью электронов (рНЕМТ), истощенные (или режим D), естественно, являются «включенными» устройствами; без входа управления затвором существует естественный канал проводимости. Входные сигналы затвора контролируют проводимость канала и включают и выключают устройство.

Поскольку обычно «выключенные» устройства улучшения (или E-режим) предпочтительны в коммутационных приложениях, это привело к разработке GaN-устройств с E-режимом. Первым был каскод из двух полевых транзисторов (рисунок 4). Теперь доступны стандартные устройства GaN с электронным режимом. Они могут переключаться на частотах до 10 МГц и до десятков кВт. Устройства на основе GaN широко используются в беспроводном оборудовании в качестве усилителей мощности на частотах до 100 ГГц.

Некоторыми из основных вариантов

использования являются усилители мощности базовых станций сотовой связи, военные радары, спутниковые передатчики и общее радиочастотное усиление. Однако из-за высокого напряжения (до 1000 В), высокой температуры и быстрого переключения они также используются в различных импульсных источниках питания, таких как преобразователи постоянного тока в постоянный, инверторы и зарядные устройства аккумуляторов.

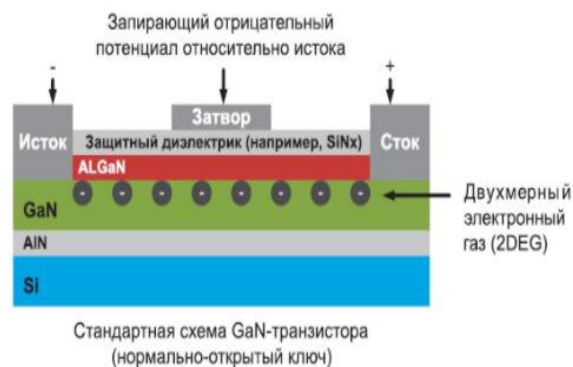


Рис. 4. Поперечный разрез кристалла галлий-нитридные (GaN)

Практика выбора транзисторов

Во многих источниках минувшей эпохи представлена технико-экономическая эффективность замены MOSFET на IGBT. Приблизительное представление о распределении рациональных областей применения между IGBT и MOSFET отражает рисунок 5 встречающийся, например, в работе [9], а также в различных других публикациях. Для определения выборки из доступных вариантов транзисторов в неизвестном диапазоне - это транзисторы на основе GaN и SiC, которые становятся все более доступными для решения проблем, связанных с автомобильным электрооборудованием. Ключевыми выводами для устройств на основе GaN и SiC являются следующие преимущества:

- 1) возможность использования высокого напряжения с приборами на 650, 900 и 1200 В для SiC транзисторов. GaN транзисторы имеют более низкое напряжение до 500 В.
- 2) GaN могут работать на более высоких частотах, чем SiC, что собственно и разграничивает их область применения.
- 3) значительно возросшая скорость переключения;
- 4) более высокая рабочая температура;
- 5) существенно сниженное сопротивление проводимости при минимальном рассеянии

мощности и большей эффективности.

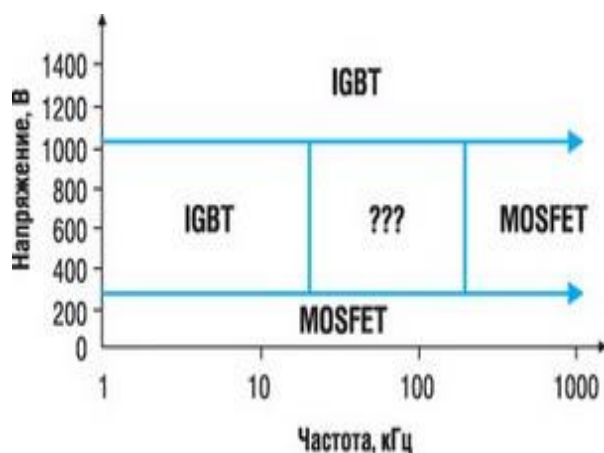


Рис. 5. Традиционное представление о распределении рациональных областей применения между MOSFET и IGBT

Воспользовавшись полученной информацией, а также используя традиционное представление о распределении рациональных областей применения между MOSFET и IGBT (рисунок 5) можно составить новое распределение, используя новые транзисторы на основе Галлие-нитридных, а также Карбидокремниевых (рисунок 6).

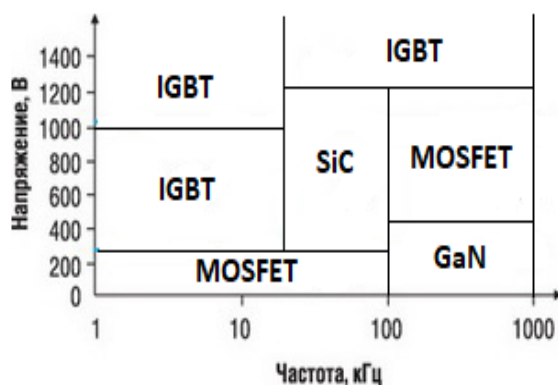


Рис. 6. Современное распределение рациональных областей применения транзисторов

Заключение

В реальной практике свойство IGBT долго закрываться хоть и является паразитным, но значительно облегчает труд схемотехников-проектировщиков. В подавляющем большинстве современных устройств используется режим жесткого переключения, что означает следующее: транзистору необходимо прекращать протекание (через себя) тока, сравнимого с номинальным, что вызывает значительные всплески

напряжения на переходе коллектор-эмиттер из-за паразитных индуктивностей печатной платы и собственных паразитных индуктивностей транзисторов. Этим объясняется невозможность достаточно полного использования токового и частотного потенциалов транзисторов любого типа. На максимально допустимой частоте переключения можно использовать не более 20% токового потенциала. С появлением компромиссных ключей SiC эта проблема проявилась в более явном виде, запас допустимого напряжения стал ниже, частота переключения и соответственно время открывания и закрывания увеличилось (уменьшилось), что привело к необходимости применять:

- 1) специальные схемы (резонансное переключение);
- 2) снабберные цепи в обвязке транзисторов, влекущие значительное удорожание обвязки транзисторов.

Благодаря высокому напряжению, высокому току и быстрому переключению, транзисторы на основе GaN и SiC предлагают конструкторам электротехники простую конструкцию, а также превосходные характеристики, что позволяет их использовать в неизвестном диапазоне, представленные на рисунке 5. Составить современное представление о распределении применения транзисторов.

Список литературы

1. А.Кай. IGBT или MOSFET? Практика выбора // Электронные компоненты, 2000, №2 - 234с.
2. Источники вторичного электропитания // С.С. Букреев, В.А. Головацкий, Г.Н. Гулякович и др.; Под ред. Ю.И. Конева // 1983-280с.
3. Шерстюк В. Транзисторные ключи для устройств силовой электроники — IGBT, MOSFET, а может быть биполярный транзистор. // Электронные компоненты, № 2, с. 59-65, №3, с. 47-51, №4, с. 62-66, 2001.
4. Воронин П.А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение // Додека, 2005, 384 с. Hobdy M., Wave energy converter, US Patent No. 8026620, 2011.
5. Компэл [Электронный ресурс]: Применение IGBT в преобразовательной технике. — Электрон. дан. — Режим доступа: <https://www.compel.ru/lib/54273/>. - Загл. с экрана.
6. ON Semiconductor [Электронный ресурс]: Разница между транзисторами на основе GaN и SiC. — Электрон. дан. — Режим доступа: <https://www.onsemi.cn/pub/Collateral/>. Загл. с экрана.
7. В.В.Иванов, А.Колпаков. Применение IGBT.

Электронные Компоненты, 1996, №1.

8. А.Колпаков. Моделирование MOSFET-транзисторов с помощью SPICE. Новые Компоненты, 1998, №5-6(8).
9. IR Application Notes: Use Gate Charge to Design the Gate Drive Circuit for Power MOSFETs and IGBTs. AN-944.
10. Blake C. and Bull Ch. IGBT or MOSFET: Choose Wisely. IR, 1999.
11. IGBT Characteristics. Application Note AN-983. IR, 2012.

References

1. A. Kai. IGBT or MOSFET? Practice of choice // electronic components, 2000, no. 2-234 p.
2. Sources of secondary power supply // S. S. Bukreev, V. A. golovatsky, G. N. Gulyakovich et al.; edited by Yu. I. Konev // 1983-280s.
3. Sherstyuk V. Transistor keys for power electronics devices-IGBT, MOSFET, and maybe a bipolar transistor. // Electronic components, no. 2, p. 59-65, no. 3, p. 47-51, no. 4, p. 62-66, 2001.
4. Voronin P. A. Power semiconductor keys: families, characteristics, applications // Dodeka, 2005, 384 p. Hobby M., wave energy Converter, US patent No. 8026620, 2011.
5. Kompel [Electronic resource]: Application of IGBT in converting technology. - Electron. Dan. - Access mode: <https://www.compel.ru/lib/54273/>. - Caption from the screen.
6. ON Semiconductor [Electronic resource]: The difference between transistors based on GaN and SiC. - Electron. dan. - Access mode: <https://www.on-semi.cn/pub/Collateral/>. - Title from the screen.
7. V. V. Ivanov, A. Kolpakov. The use of IGBT power module. Electronic Components, 1996, No. 1.
8. A. Kolpakov. MOS MOSFET-Spice Spice. New Components, 1998, No. 5-6(8).
9. IR instructions for use: Use the gate charge in the design of the gate drive circuit for power MOSFET transistors and Btiz. An-944.
10. Blake C. and Bull Ch. IGBT or MOSFET: Choose Wisely. IR, 1999.
11. IGBT Characteristics. Application Note AN-983. IR, 2012.

УДК.621.039

Перспектива применения МОКС-топлива в атомной энергетике

А.И. Лыжин¹, И.А. Кочетов².

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹ landreg20@yandex.ru, ² kochetov.vano@mail.ru,

Статья поступила 13.04.2021 г.; после доработки 16.04.2021 г.

Аннотация

В статье анализируется ядерное топливо, применяемое на различных реакторных установках, действующих АЭС России, оценивается его современное состояние. Рассмотрены перспективные разработки топлива и эффект, достижимый за счет их внедрения. Описывается ядерно-топливный цикл (ЯТЦ) на современном этапе развития и предлагается путь его развития в направлении МОКС-топлива. Описана схема получения таблеточного уран-плутониевого топлива на опытном стенде ГХК.

Ключевые слова: ядерное топливо, МОКС-топливо, тепловыделяющая сборка, ЯТЦ, плутоний, уран.

The prospect of using MOX fuel in the nuclear power industry

A.I. Lyzhin¹, I.A. Kochetov²

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia. ¹ landreg20@yandex.ru, ² kochetov.vano@mail.ru

Received 13.04.2021 y.; received in final form 16.05.2021 y.

Abstract

The article analyzes the nuclear fuel used at various reactor installations operating at Russian nuclear power plants, and assesses its current state. Promising fuel developments and the effect achieved through their implementation are considered. The nuclear fuel cycle (NFC) at the present stage of development is described and the way of its development in the direction of MOX fuel is proposed. A scheme for the production of tablet uranium-plutonium fuel at the experimental stand of the GCF is described.

Keywords: nuclear fuel, MOX-fuel, fuel assembly, NFC, plutonium, uranium.

Введение

В России широко используется атомная энергетика. Для получения электроэнергии используют ядерное топливо. Материалы, используемые в ядерных реакторах для осуществления управляемой ядерной реакции, называются ядерным топливом.

Для получения последнего, необходимо добыть урановую руду. Но для дальнейшей выработки энергии этого недостаточно потому, что ее следует обработать, очистить от различных примесей, провести операцию обогащения и в конечном итоге поместить в топливные сборки (ТВС). Для обеспечения устойчивости ядерной

энергетики необходим устойчивый ядерный топливный цикл.

Расширение использования ядерной энергетики налагает строгие требования на деятельность в области ядерного топливного цикла и на понимание поведения материалов, используемых в ядерных реакторах.

Ядерный топливный цикл

Перед загрузкой в реактор уран должен пройти ряд технологических пределов, называемые топливным циклом. Ядерный топливный цикл делится на:

- открытый (разомкнутый), предполагающий

захоронение отработанного ядерного топлива и радиоактивных отходов

- закрытый, нацеленный на переработку отработанного топлива для извлечения ценных элементов.

Открытый топливный цикл определяется малой эффективностью применения природного урана.

Так как горючее является высокоактивным радиоактивным отходом и не годится, для дальнейшего использования попадает (перевозится) на склад хранения отработанного ядерного топлива.

Проблемой атомной энергетики является его малое количество в природе. Ввиду истощения урана 235 все больше появляется тенденция применения плутония 239, используя замкнутый цикл.

Достоинством закрытого ЯТЦ является возврат в использование дорогих делящихся материалов, а именно уран и плутоний, которые способны максимально долго обеспечивать энергией.

На данный момент выбор открытого или закрытого топливного цикла является серьезной задачей ввиду своей дороговизны и опасности.

Решением этого вопроса послужит ввод энергоблока № 4 Белоярской АЭС (Свердловская область) с реактором на быстрых нейтронах БН-800, который впервые в истории отечественной атомной энергетики полностью перейдет на уран-плутониевое МОКС-топливо на рис.1. Это станет важным шагом на пути к замыканию ядерно-топливного цикла.

Методы изготовления МОКС-топлива

В настоящее время реакторы типа РБМК, ВВЭР и БН применяют оксидное топливо. Госкорпорация «Росатом» реализовала проект по разработке и внедрению смешанного оксидного топлива (МОКС).

Существует шесть технологических методов изготовления МОКС-топлива на рис.2:

- использование механического смешивания и совместного размол порошков оксидов урана и плутония
- способ химического соосаждения порошков

(U, PuO₂) в присутствии поверхностно-активных веществ

- плазмохимическая конверсия
- совместное осаждение с гидроксидом аммония
- золь-гель метод
- пироэлектрoхимический метод

В данной статье рассмотрены несколько методов более подробно.

В первом случае важной особенностью является тонкий размол (микронизация) порошков UO₂ и PuO₂, который позволяет максимально уплотнить частицы до необходимого качества. Процесс смешивания осуществляется в высокоэнергетической мельнице, где образуется однородная система МОКС с повышенной плотностью за короткий промежуток времени. Недостатком этого метода является образование отходов, загрязненные плутонием, и пыльная технология производства.

Второй метод получения МОКС-топлива при помощи химического соосаждения порошков (U, Pu)O₂ связан с получением соединения (NH₄)₂(U,Pu)O₂(CO₃)₃.

Этот осадок является гомогенным твердым раствором, который образуется с помощью кальцинации при температуре 600 для получения текучего порошка U-PuO₂, который растворяется в кипящем растворе HNO₃.

Третий способ производства UO₂ и PuO₂ характеризуется совместной конверсией раствора нитратов плутония и урана, которая основана на высокотемпературной денитрации и дигратации растворов методом микроволнового (СВЧ) нагрева.

Сложность данного метода заключается в особенно эффективной очистки отходящих газов, но в то же время очень удобна для автоматизации и использования защитных перчаточных боксов.

Существуют одиннадцать защитных перчаточных боксов, которые служат для выполнения технологических операций по приему исходных продуктов, их смешиванию, прессованию, спеканию, определению плотности и геометрических размеров таблеток МОКС-топлива.

Схематично расположение и назначение устанавливаемых перчаточных боксов представлено на рис. 3.



Рис. 1. Прямое производство МОКС-порошков из раствора нитратов урана и плутония

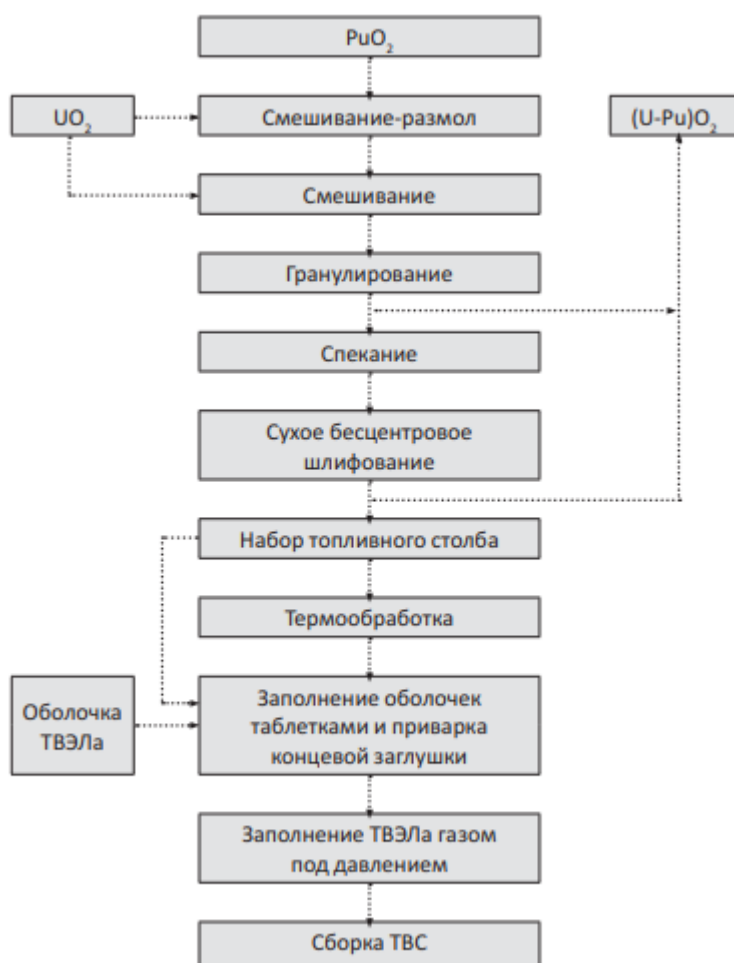


Рис. 2. Типичный процесс изготовления МОКС-топлива

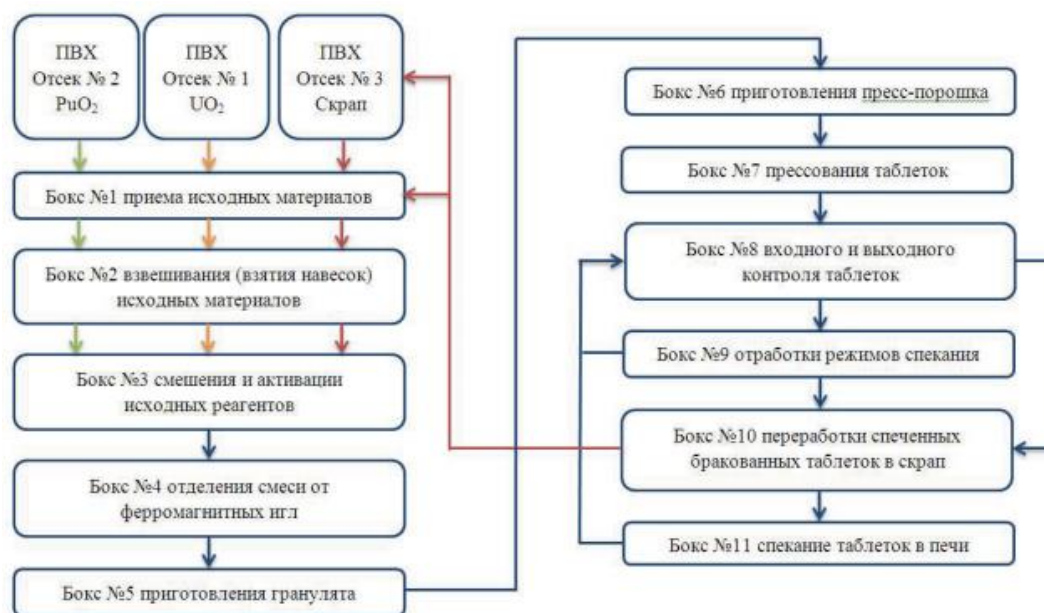


Рис. 3. Схематичное расположение и назначение боксов опытного стенда по отработке режимов спекания таблеточного МОКС-топлива

МОКС-топливо для реакторов типа БН

Рассмотрев производство получения МОКС-топлива можно внедрить его в реактор типа БН.

В наши дни, реактор БН-600 работает с активной зоной из высокообогащенного урана с воспроизводящими торцевыми и боковыми экранами из обедненного урана. Существует программа перевода БН-600 на гибридную активную зону, она предполагает:

- загрузку ТВС с МОКС-топливом на периферии активной зоны при одновременном сохранении урановых ТВС ближе к центру зоны. При этом конструкция МОКС ТВС будет аналогична конструкции урановых ТВС;
- использование МОКС-топлива в зоне высокого обогащения (около 20% активной зоны), что позволит израсходовать 0.271т плутония в год.

Год подключения к сети IV энергоблока Белоярской АЭС с РУ БН-800 – 2015 г., но еще задолго до ввода в эксплуатацию был запущен процесс изготовления топлива для стартовой загрузки активной зоны реактора.

На начальной стадии загрузки активна зона состоит из нескольких типов ТВС – с урановым оксидным топливом различного обогащения (массовая доля урана-235 – 18,5%, 21%, 24%), со смешанным уранплутониевым оксидным табле-

точным топливом, со смешанным уран-плутониевым оксидным виброуплотненным топливом.

Использование в реакторе БН-800 уран-плутониевого топлива позволяет:

- создать экологически чистый —замкнутый ядерный топливный цикл;
- в 50 раз увеличить использование —отработанного природного урана, и обеспечить атомную энергетику России топливом на длительный промежуток времени, благодаря воспроизводству;
- утилизировать отработанное ядерное топливо АЭС на тепловых нейтронах.
- утилизировать радиоактивные отходы путем вовлечения в полезный производственный цикл отвального урана и плутония. [1].

Одним из основных показателей качества топлива является его плотность. Для достижения необходимой плотности должны быть выполнены следующие три фактора.

1. Исходный порошок. Порошок UO_2 и PuO_2 , обеспечивающий образование флюоритовой кубической фазы. Конечный контроль площади поверхности порошка и размеров зёрен.

2. Температура спекания. Спекание проводится в промежутке температур 1650–1700 °С для создания обратной диффузии катионов.

3. Атмосфера. Для контроля окислительно-восстановительных процессов в смеси используется смешанная атмосфера аргона и водорода.

Оборудование стенда находится в герметич-

ных защитных боксах, оснащенных специальными перчатками (крагами) для проведения технологических работ и обслуживания оборудования. Плутоний является высокотоксичным соединением, поэтому к производству МОКС-топлива предъявляют повышенные требования к технике безопасности, которые значительно серьёзнее, чем в производстве топливных таблеток из UO_2 .

Ввиду особых радиационных свойств и высокой токсичности требуется проектировать соответствующую планировку завода и специфическое выполнение рабочих операций, поэтому защитные боксы оборудованы биологической защитой, обеспечивающие радиационную безопасность обслуживающего персонала с диоксидом плутония и диоксидом урана, которая подтверждена: • заключением ФГУП «ГНЦ РФ-ФЭИ» по ядерной безопасности опытного стенда с печью «GERO»; • заключением ФГБУ ВНИИПО МЧС РОССИИ по результатам анализа пожаровзрывоопасности при проведении работ на опытном стенде ФГУП «ГХК» по спеканию таблеток МОКС-топлива в садочной печи фирмы «GERO». Тестирование таблеток планируется выполнять в ЦЗЛ, используя для передачи проб линию пневмопочты.

Заключение

В будущем формирование замкнутого ядерно-топливного цикла позволит создать двухкомпонентную атомную энергетику с одновременной работой реакторов на быстрых и на тепловых нейтронах. Это позволит многократно расширить топливную базу атомной энергетики, вовлечь в работу изотоп урана-238, обеспечить повторное использование отработавшего ядерного топлива и минимизировать радиоактивные отходы.

Список литературы

1. Котельников Р. Б., Башлыков С. Н., Каштанов А. И., Меньшикова Т. С. Высокотемпературное ядерное топливо. М.: Атомиздат, 1978.
2. Ма Б. М. Материалы ядерных энергетических установок. М.: Энергоатомиздат, 1978.
3. Бобылев А. И. и др. Атомная энергия. 2003. Т. 95, № 4. С. 301–305.
4. Жиганов А. Н. и др. Технология диоксида урана для керамического ядерного топлива. Томск: STT, 2002. С. 61–91.
5. Фаворский, О.Н. Об энергетике России в ближайшие 20-30 лет [Текст] / О.Н. Фаворский // Вестник Российской академии наук. – 2007. –

- Вып. 2. – Т. 77. – С. 121–127.
6. Драгунов, Ю.Г. и др. Разработка и внедрение ТВС-2М для перспективных топливных циклов [Текст] / Ю.Г. Драгунов, С.Б. Рыжов, И.Н. Васильченко, С.Н. Кобелев // Атомная энергия. – 2005. – Т. 99. – №6. – С. 432–437.
7. Кандалов, В.Б. и др. Тепловыделяющая сборка ТВСА ВВЭР-1000: направления развития и результаты эксплуатации [Текст] / В.Б. Кандалов, Д.Г. Преображенский, А.И. Романов, О.Б. Самойлов, А.А. Фальков, А.А. Шишкин // Атомная энергия. – 2007. – Т. 102. – №1. – С. 43–48.

References

1. Kotelnikov R. B., Bashlykov S. N., Kashtanov A. I., Menshikova T. S. High-temperature nuclear fuel. M.: Atomizdat, 1978.
2. Ma B. M. Materials of nuclear power plants. M.: Energoatomizdat, 1978.
3. Bobylev A. I. et al. Nuclear Power Engineering, 2003. Volume 95, No. 4. pp. 301-305.
4. Zhiganov A. N. et al. Uranium dioxide technology for ceramic nuclear fuel. Tomsk: STT, 2002. pp. 61-91.
5. Favorsky, O. N. About the energy sector of Russia in the next 20-30 years [Text] / O. N. Favorsky // Bulletin of the Russian Academy of Sciences. - 2007. - Issue 2. - Vol. 77. - p. 121-127.
6. Dragunov Yu. G. et al. Development and implementation of fuel assemblies-2M for advanced fuel cycles [Text] / Yu. G. Dragunov, S. B. Ryzhov, I. N. Vasilchenko, S. N. Kobelev // Nuclear power engineering. - 2005. - Vol. 99. - No. 6. - p. 432-437.
7. Shackles etc. V. B. V. B. Shackles, D. G. Preobrazhensky, A. I. Romanov, O. B. Samoilov, A. A. Falkov, A. A. Shishkin, "Fuel Assembly TVSA VVER-1000: development and results of operation" for Atomic power. - 2007. - T. 102. - No. 1. - p. 43-48.

УДК 621.316.718

Совершенствование защиты от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35кВ

А.К. Пронина¹, К.П. Путилин²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, pronina-a@bk.ru, putilin-kp39@mail.ru

Статья поступила 23.04.2021 г.; после доработки 27.04.2021 г.

Аннотация

В системах 10...35кВ частым повреждением является замыкание фазы на землю через электрическую дугу. В разветвленных системах емкости фаз велики и токи через них могут обеспечивать длительное горение дуги между фазой и землей. Для уменьшения тока в дуге между нейтралью трансформатора и землей включается реактор. Предусматривается регулирование реактора при настройке в резонанс с емкостью сети для эффективного гашения дуги. В данной публикации предлагается более совершенный способ регулирования на основе средней силовой высоковольтной электроники.

Ключевые слова: Однофазные замыкания на землю, замыкания через дугу, устойчивость дуговых замыканий, режим нейтрали, замыкание нейтрали через реактор, настройка реакторов.

Improvement of protection against single-phase earth faults in 6-35kv networks

A.K. Pronina¹, K.P. Putilin²

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
pronina-a@bk.ru, putilin-kp39@mail.ru

Received 23.04.2021 y.; received in final form 27.04.2021 y.

Annotation

In systems of 10...35 kV, a frequent damage is the closure of the phase to the ground through an electric arc. In branched systems, the phase capacitances are large and the currents through them can provide a long-term arc burning between the phase and ground. To reduce the current in the arc between the transformer neutral and the ground, the reactor is switched on. The reactor is regulated when tuned in resonance with the network capacity for effective arc quenching. This publication suggests a more advanced control method based on medium-power high-voltage electronics.

Keywords: Single-phase earth faults, arc faults, arc fault stability, neutral mode, neutral fault through the reactor, reactor setup.

Введение

Однофазные замыкания на землю в сетях 6-35кВ составляют до 90% всех повреждений [5]. Причинами повреждения являются местные ослабления электрической прочности изоляции и перенапряжения. Подавляющее большинство замыканий на землю сопровождается возникновением дуги. Образовавшаяся дуга поддержива-

ется напряжения неповрежденных фаз. При малых токах дуга самоугасает, при больших - может гореть длительно, повреждая изоляцию и создавая условия для междуфазных замыканий [2].

Постановка задачи

Решение проблемы быстрой и точной настройки реактора в резонанс с емкостью сети

для уменьшения горения тока дуги при замыкании фазы на землю. Предложен и обоснован более совершенный способ регулирования на основе схемы средней силовой высоковольтной электроники.

Описание исследования

Путь замыкания тока дуги проходит через емкости неповрежденных фаз относительно земли, как показано на рис.1.

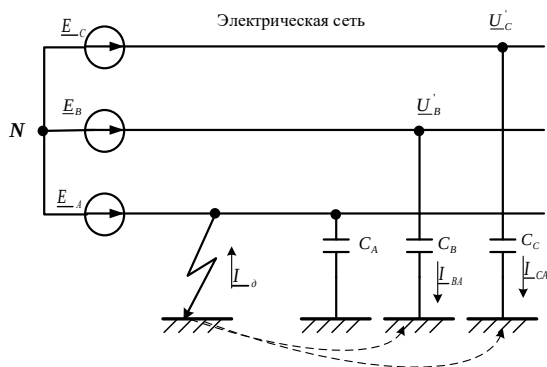


Рис.1. Образование тока дуги в месте замыкания фазы А на землю и изолированной нейтрали.

При соединении одной фазы (фазы А) с землей, нейтраль (точка N) приобретает потенциал $U_N = -U_A$, а фазные напряжения неповрежденных фаз возрастают до значения линейного $|U'_B| = |U'_C| = U$.

Для ослабления тока дуги нейтраль N трансформатора сети заземляют через дугогасящий реактор, рис.2.

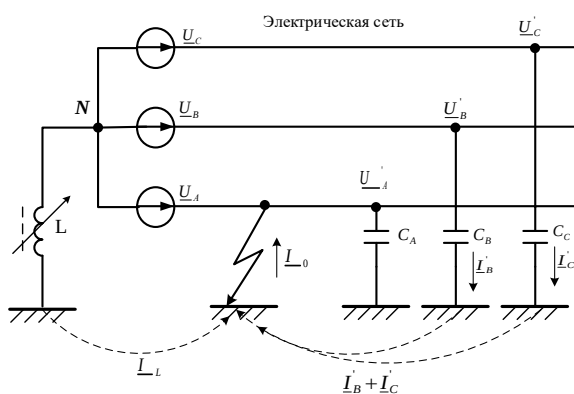


Рис.2. Схема замыкания токов фазы А на землю в сети с заземленной через реактор нейтралью.

Ток дуги:

$$I_d = I'_B + I'_C,$$

где емкостные токи неповрежденных фаз:

$$I'_B = U'_B \cdot \omega C_B; \quad I'_C = U'_C \cdot \omega C_C.$$

Напряжения U'_B и U'_C сдвинуты по фазе на угол 60° , полагая далее $C_A = C_B = C_C = C$ находим ток дуги по модулю.

$$|I_d| = |I'_B + I'_C| = 2I'_B \cos 30^\circ = 3\omega C \cdot U_\phi$$

При коротких линиях, особенно воздушных, емкость линии мала и дуга быстро самоугасает. При длинных и разветвленных сетях дуга может гореть длительно. Погасание дуги происходит при токах не более 5-10А, а при токах 10А и более принимаются меры к ее ослаблению.

Схема трехфазной системы (а) и векторная диаграмма напряжений и токов (б) при замыкании на землю фазы А, представлена на рис. 3.

Используя схему рис.3 составим схему замещения, рис.4, где емкость линии $C_\Sigma = 3C$, C — емкость фазы по отношению к земле.

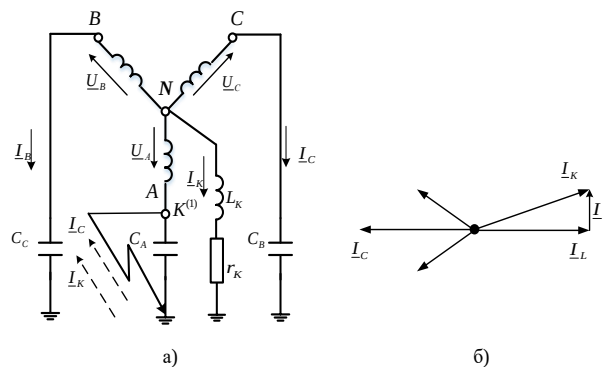


Рис.3. Схема трехфазной системы (а) и векторная диаграмма токов (б) при замыкании на землю фазы А

Цепь катушки реактора $L_K - r_K$ заменим параллельно соединенными проводимостями:

$$Y_K = \frac{1}{r_K + j\omega L_K} = \frac{r_K}{r_K^2 + (\omega L_K)^2} - j \frac{\omega L_K}{r_K^2 + (\omega L_K)^2}$$

или

$$Y = g - jb_L$$

Если $r_K \ll \omega L_K$, тогда

$$g \approx \frac{r_K}{(\omega L_K)^2}; \quad b_L \approx \frac{1}{\omega L_K}$$

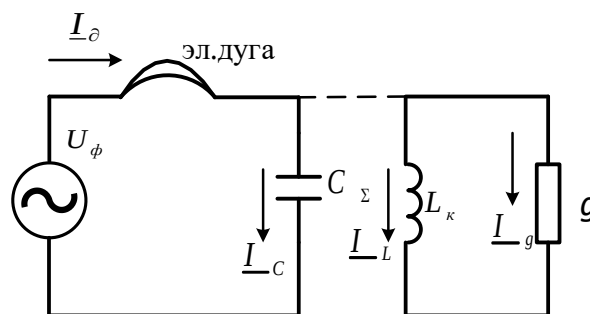


Рис.4. Схема замещения при замыкании на землю одной из фаз системы с дугогасящим реактором

По схеме замещения ток дуги

$$I_{\partial} = \underline{U} \left(j\omega C_{\Sigma} + \frac{1}{j\omega L} + g \right) = \underline{U} \cdot \underline{Y},$$

комплексная проводимость всей цепи

$$\underline{Y} = \frac{r_K}{(\omega L_K)^2} - j \left(\frac{1}{\omega L_K} - \omega C_{\Sigma} \right) = g - j(b_L - b_C)$$

При резонансе ток дуги минимизируется

$$I_{\partial} = \underline{U}g = U \frac{r_K}{(\omega L_K)^2},$$

Так как

$$b = b_L - b_C = \frac{1}{\omega C} - \omega C_{\Sigma} = 0$$

Известно, что емкость сети относительно земли может меняться в широких пределах вследствие подключения и отключения различных участков сети, индуктивность реактора необходимо менять [1].

Заземляющие дугогасящие реакторы (ЗДР) выпускаются двух типов [1]:

- со ступенчатым регулированием (РЗДСОМ) с диапазоном регулирования индуктивности $D=2:1$
- с плавным регулированием (РЗДПОМ) диапазоном регулирования индуктивности $D=5:1$

Ступенчатое регулирование индуктивности осуществляется вручную штурвалом на отключенном от сети реакторе, число ответвлений – пять.

Плавность регулирования возможна изменением воздушного зазора в магнитопроводе управляемым устройством автоматической компенсации, без отключения реактора от сети и при отсутствии в сети замыкания на землю. Регуляторы включаются в работу при изменении емкости сети, относительно земли.

Недостатком рассмотренных способов настройки реактора в резонанс с емкостью сети является необходимость механического регулирования индуктивности реактора, которая определяется формулой:

$$L = G_M \cdot (w_K)^2$$

Покажем возможность настройка резонанса по балансу индуктивных мощностей.

Цепь, состоящую из параллельно соединенных ветвей - активной проводимости g , индуктивности L и емкости C в режиме однофазного КЗ можно анализировать из баланса мощностей

в ветвях L-C, рис.5.

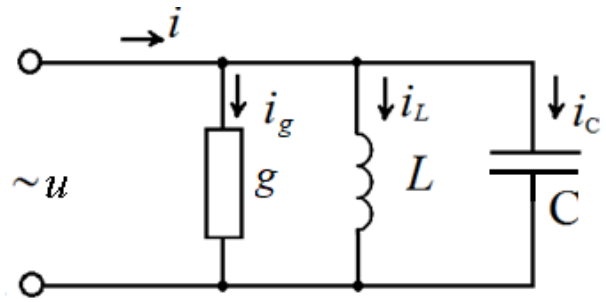


Рис.5. Цепь параллельных ветвей g - L - C

Сформулируем условие резонанса исходя из баланса реактивной мощности [5]. Применяя первый закон Кирхгофа имеем:

$$i = i_g + i_L + i_C. \quad (1)$$

Токи в ветвях выражаем через приложенное напряжение:

- ток в ветви с активной проводимостью $i_g = u \cdot g$ (2)
- ток в ветви с индуктивностью

$$i_L = \frac{\psi}{L},$$

где потокосцепление ψ находится из равенства

$$\begin{aligned} d\psi &= u \cdot dt, \\ \psi &= \int_0^t u dt + \psi(0), \end{aligned}$$

при этом ток в ветви с индуктивностью

$$i_L = \frac{1}{L} \int_0^t u dt + i_L(0), \quad (3)$$

$$i_L(0) = \frac{1}{L} \psi_L(0) \text{ при } t = 0$$

Ток в ветви с емкостью

$$i_C = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(Cu) = C \frac{du}{dt} \quad (4)$$

Таким образом, дифференциальное уравнение рассматриваемой цепи, имеет вид:

$$gu + C \frac{du}{dt} + \frac{1}{L} \int_0^t u dt + i_L(0) = i \quad (5)$$

Пусть на вход цепи подается синусоидальное напряжение

$$u = U_m \cdot \sin \omega t. \quad (6)$$

Тогда ток в цепи может быть представлен

как

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi), \quad (7)$$

где φ - угол между напряжением и током.

Подставив (6) и (7) в уравнение цепи (5), получим:

$$g \cdot U_m \cdot \sin \omega t + U_m \omega \cdot \cos \omega t - \frac{1}{\omega L} U_m \cdot \cos \omega t = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (8)$$

Откуда токи ветвей

$$\begin{aligned} i_g &= g \cdot U_m \sin \omega t \\ i_L &= -\frac{1}{\omega L} \cdot U_m \cos \omega t \\ i_C &= \omega C \cdot U_m \cos \omega t \end{aligned}$$

Будут определять мощность каждой ветви

$$\begin{aligned} P_a &= g \cdot U_m^2 \sin^2 \omega t \\ P_L &= -b_L \cdot U_m^2 \cos \omega t \cdot \sin \omega t \\ P_C &= b_C \cdot U_m^2 \cos \omega t \cdot \sin \omega t \end{aligned}$$

Учитывая, что $\sin^2 \omega t = \frac{1}{2}(1 - \cos 2\omega t)$;

$$\cos \omega t \cdot \sin \omega t = \frac{1}{2} \sin 2\omega t$$

Окончательно находим реактивные мощности в ветвях

$$\left. \begin{aligned} p_a &= gU^2(1 - \cos 2\omega t) \\ p_L &= -b_L U^2 \cdot \sin 2\omega t; \\ p_C &= b_C U^2 \cdot \sin 2\omega t \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

где $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ - действующее значение напряжения.

Разные знаки мощностей p_L и p_C в (9) показывают их встречное направление и обозначают взаимный одновременный обмен энергиями магнитного поля индуктивности и электрического поля емкости [4].

При резонансе проводимостей $b_L = b_C$, следовательно, для любого момента времени имеем

$$p_L = -p_C \quad (10)$$

Это исходит из баланса энергии и, как следствие, мощностей

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{Li^2}{2} \right) = -\frac{d}{dt} \left(\frac{Cu^2}{2} \right)$$

то

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{Li^2}{2} \right) &= Li \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt} \cdot i = u \cdot i_L \\ -\frac{d}{dt} \left(\frac{Cu^2}{2} \right) &= -Cu \frac{du}{dt} = -u \frac{d(Cu)}{dt} = -u \cdot i_C, \end{aligned}$$

Таким образом, условие резонанса может быть определено, как условие баланса по величине индуктивной и емкостной мощностей.

В линейных цепях обеспечение условий

резонанса при $\omega = \text{const}$

$$\omega^2 LC = 1$$

требует при изменении одного из двух параметров, например, емкости C , изменения другого параметра – индуктивности L .

Так, в случае с заземлённой через реактор нейтрали, индуктивность реактора должна регулироваться для настройки в резонанс механическим путем.

Необходимость регулирования индуктивности – одна из проблем систем защит от однофазных замыканий на землю. Под защитой здесь понимается минимизация тока дуги и времени ее самоугасания, достигаемые за счет резонанса.

Механическое регулирование индуктивности реактора сложно и не обеспечивает точности настройки, а также не обладает желательным быстродействием.

Решение проблемы быстрой и точной настройки реактора в резонанс предлагается осуществлять за счет регулирования тока через реактор, согласно формуле

$$Q_L = \omega L_p I^2,$$

за счет однофазного прерывателя переменного тока [5], включаемого последовательно с катушкой реактора.

Максимальный ток через емкость имеет место при наибольшей длине линии, то есть при наибольшей возможной емкости сети относительно земли C_m . Исходя из этого значения емкости максимальный емкостной ток можно записать

$$I_m = \omega C_m \cdot U_\phi$$

И исходя из величины этого тока, определяем баланс мощностей, необходимый для резонанса:

$$\omega \cdot L_p \cdot I_m^2 = \omega \cdot C_m \cdot U_\phi^2, \quad (11)$$

откуда находим

$$L_p = C_m \left(\frac{U_\phi}{I_m} \right)^2 \quad (12)$$

Мощность реактора

$$S_L = U_\phi \cdot I_m = \omega C_m U_\phi^2 \quad (13)$$

В последующем индуктивность не регулируется, то есть $L_p = \text{const}$. Так как емкость линии может только уменьшаться, то для сохранения баланса $Q_L = Q_C$ должен уменьшаться ток. Исходя из условия (11), имеем:

$$\frac{I_L^2}{I_m^2} = \frac{C}{C_m} \Rightarrow I_L = \sqrt{\frac{C}{C_m}} \quad (14)$$

То есть ток реактора должен меняться про-

порционально корню квадратному относительной величины емкости линии.

Прерыватели переменного тока в цепях высокого напряжения (десятки киловольт) стали применяться после разработки высоковольтных силовых полупроводниковых управляемых приборов [3]. Простейшим прерывателем может служить симметричный тиристорный элемент, выполненный по схеме, рис.6

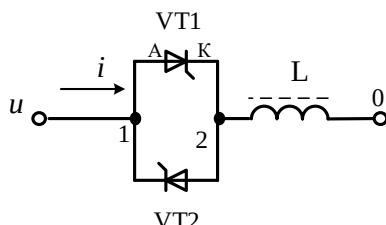


Рис. 6. Симметричный тиристорный элемент, работающий на индуктивную нагрузку

Ток через тиристор VT1, начинает протекать при условии наличия на аноде А по отношению к катоду К положительного потенциала в момент подачи положительного узкого импульса на управляющий электрод. При появлении положительного напряжения подача импульса не позволит открыть тиристор VT1, так как встречный ток, еще протекающий через VT2 шунтирует VT1 и напряжение на его аноде А и катode К фактически одинаковое, то есть $u_{12} = 0$. И только при уменьшении встречного тока через VT2 до нуля на тиристор VT1 может быть подан отпирающий импульс. При чисто индуктивной нагрузки угол управления α оказывается больше 90° ($\pi/2$) [3]. Ток нагрузки на интервале один полупериод можно определить, решив дифференциальное уравнение

$$L \frac{di}{d(\omega t)} = \sqrt{2}U \cdot \sin \omega t$$

с начальным условием $i_n = 0$ при $\omega t = \alpha$.

Решение этого уравнения

$$i = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t)$$

Действующее значение тока цепи индуктивности при симметричном управлении будет выражаться формулой:

$$I = \frac{\sqrt{2}U}{\omega L} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{2\pi-\alpha} (\cos \alpha - \cos \omega t)^2 dt},$$

которая после интегрирования дает расчетную

формулу тока

$$I_L = \frac{2U}{\omega L} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[(\pi - \alpha) \left(\cos^2 \alpha + \frac{1}{2} \right) + \frac{3}{2} \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right]}$$

Так при $\alpha = \pi/2$ и $\cos \alpha = 0$

$$I_L = \frac{2U}{\omega L} \sqrt{\frac{1}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{2}} = \frac{U}{\omega L}$$

При увеличении $\alpha > \pi/2$ ток в индуктивности I_L будет уменьшаться.

Изменение тока от угла управления (о.е) представлено на рис.7

$$I_*(\alpha) = \frac{I(\alpha)}{I(\pi/2)} = I(\alpha) \frac{\omega L}{U}, \quad (15)$$

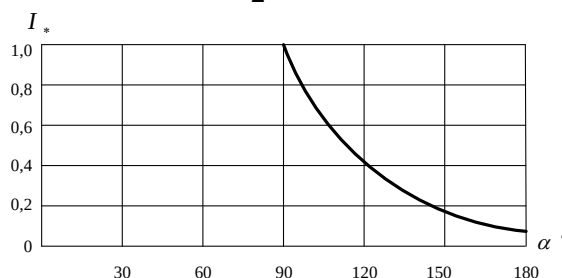


Рис.7. Характеристики управления по току симметричного элемента, работающего на индуктивную нагрузку

Схема включения реактора ЗДР в нейтраль трансформатора через тиристорный прерыватель СТЭ показана на рис.8

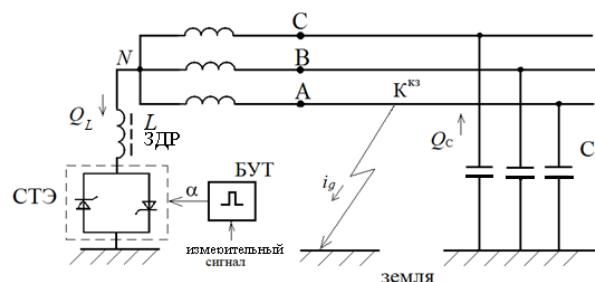


Рис.8. Функциональная схема быстродействующей дуговой защиты от замыкания фазы на землю

Диапазон регулирования тока определяется в пределах от номинального (максимального, при $\alpha = \pi/2$) до нуля ($\alpha = \pi$). Максимальная величина тока находится из условия равенства мощностей $Q_C = Q_L$

$$3\omega C_0 l_{max} U_{\phi}^2 = \omega L I_{n(\pi/2)}^2 = x_L I_n^2,$$

где слева мощность, поступающая от земли через емкость в линию, а справа мощность через

реактор на землю.

Реактор выбираем, исходя из резонанса при максимальной длине линии и наибольшей емкости линии относительно земли

$$\frac{1}{\omega L} = \omega C_0 l_{max}.$$

Тогда величина индуктивности

$$L_{min} = \frac{1}{\omega^2 C_0 l_{max}}$$

$$I_{max} = \frac{U_{\phi}}{\omega L_{min}}$$

Расчетная мощность реактора

$$Q_L = L_{min} \cdot I_{max}^2 = \frac{U_{\phi}^2}{\omega L_{min}}.$$

В схемах эффективного заземления нейтрали реактивная мощность Q_L регулируется изменением индуктивности реактора L_p [5].

В предлагаемом способе регулирование индуктивной мощности реактора Q_L в соответствии с изменяющейся емкостной мощностью линии Q_C , осуществляется изменением реактивного тока $I(\alpha)$:

$$L_{min} I_L(\alpha)^2 = Q_C(l)$$

Если емкостная мощность Q_C изменяется, то необходимая величина тока реактора I_L для уравновешивания $Q_C = Q_L$ может быть определена из формулы:

$$I_{Lmax}(\alpha) = \sqrt{\frac{Q_C}{L_{min}}}$$

Максимальный ток будет определяться при минимальной индуктивности $L = L_{min}$ и при угле $\alpha = 90^\circ$.

Заключение

Необходимая величина тока через реактор должна определяться по результатам измерения емкостной мощности сети Q_C или емкостного тока. При этом ток реактора должен уменьшаться при уменьшении емкостного тока за счет регулирования α . Угол управления α симметричного тиристорного элемента СТЭ (рис.8) находится на основании обратной функции $\alpha = f(I_\alpha)$, по отношению к зависимости $I_\alpha = f'(\alpha)$, полученной ранее.

На схеме: БУТ-блок управления тиристорами получает информацию по двум каналам: по каналу напряжения нейтрали и фазы этого напряжения, которая зависит от замкнутой на землю жилы кабеля сети (или линейного провода для воздушной линии); и по каналу поступления измерительной информации о текущем значении

емкости линии относительно земли или емкостной мощности. По этим данным определяется необходимый угол управления α тиристорами СТЭ.

Для формирования самих импульсов управления используются формирователи с частотой следования импульсов, синхронизируемых с частотой сети. С появлением замыкания фазы на землю в цепи СТЭ и дросселя появляется обратное напряжение замкнутой на землю фазы. Угол α подачи импульсов на управляющие электроды тиристорных обеспечивает задаваемую величину тока I_α и, следовательно, баланс реактивных мощностей $Q_C = Q_L$, то есть режим параллельного резонанса.

Отдельной является задача формирования сигнала и угла управления α для работы СТЭ в цепи катушки реактора. Отметим, что решение этого вопроса возможно на базе оборудования и измерительной техники, которой оснащены современные дугогасящие реакторы [5].

Список литературы

1. Баумштейн И.А. Справочник по электрическим установкам высокого напряжения / под ред. И.А. Баумштейна, С.А. Бажанова. - 3-е изд., перераб., и доп. М.: Энергоатомиздат, 1989. - 768с.
2. Дмоховская Л.Ф. Техника высоких напряжений. Учебник для студентов электротехнических и электроэнергетических специальностей вузов. В. П. Ларионов, Ю. С. Питаль, Д. В. Разевиг, Е. Я. Рябкова. Под общей ред. Д. В. Разевига. Изд.2-е, перераб., и доп. М.: «Энергия», 1976 - 488с.
3. Зиновьев Г.С. Силовая электроника: учеб. пособие / Г.С. Зиновьев. - 5-е изд. испр. и доп.. - М.: Издательство Юрайт, 2015. - 667с.
4. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан, в 2-х томах,. Учебник для вузов, 1 том, 3-е изд., перераб. и доп.- Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-е, 1981. - 536с.
5. Шабад М.А. Защита от однофазных замыканий на землю в сетях 6-35 кВ. - М.: НТФ «Энергопрогресс», 2007. - 64с.

References

1. Baumshtein I. A. Handbook of electrical installations of high voltage / ed. by I. A. Baumshtein, S. A. Bazhanov. - 3rd ed., p. rerab., and add. M.: Energoatomizdat, 1989 - - 768s.
2. Dmikhovskaya L. F. Technique of high voltages. Textbook for students of electrical engineering and electric power specialties of universities. V. P. Larionov, Yu. S. Pital, D. V. Razevig, E. Ya. Ryabkova. Under the general editorship of D. V. Razevi-ga. Ed.

-
- 2-e, pererab., and add. M.: "Energy", 1976-488s.
3. Zinoviev G. S. Power electronics: textbook. posobie / G. S. Zinoviev – - 5th ed. ispr. i dop. - M.: Yurayt Publishing House, 2015. - 667s.
 4. Neiman L. R. Theoretical foundations of electro-technology / L. R. Neiman, K. S. Demirchan, in 2 volumes,. Textbook for universities, volume 1, 3rd ed., transl. and additional - L.: Energoizdat. Leningr. otd-e, 1981 – - 536s.
 5. Shabad M. A. Protection from single-phase earth faults in networks of 6-35 kV. - M.: NTF "Energo-progress", 2007. –64s

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

**Возможности увеличения выходных характеристик
фотоэлектрических преобразователей в зависимости от оптической
прозрачности защитных покрытий**

Н.А. Власов ¹, В.В.Кувшинов ², Е.Г. Какушина³,
М.Ю. Сперанский ⁴, А.А. Лавренчук ⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹mr.asphodel@mail.ru., ²kuvshinov.vladimir@gmail.com ³littie@mail.ru,
⁴MYSperanskiy@sevsu.ru, ⁵AALavrenchuk@sevsu.ru

Статья поступила 23.04.2021 г.; после доработки 28.04.2021 г.

Аннотация

В работе приведены результаты исследований, проведенных в Сев ГУ на площадке кафедры ВИЭЭСС, с целью определения возможностей увеличения выходных параметров монокремниевых фото-электрических преобразователей, а также использования их в качестве измерительной техники для определения прозрачности веществ, применяемых в солнечных установках.

Ключевые слова: монокремниевые фото-электрические преобразователи, гелиоколлектор, фотоэлектрическая пластинка

**Possibilities of increasing the output characteristics of photoelectric
converters depending on the optical transparency of protective coatings**

N.A. Vlasov ¹, V.V. Kuvshinov ², E.G. Kakushina ³,
M.Yu. Speranskiy ⁴, A.A Lavrenchuk ⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹mr.asphodel@mail.ru, ²kuvshinov.vladimir@gmail.com ³littie@mail.ru,
⁴MYSperanskiy@sevsu.ru, ⁵AALavrenchuk@sevsu.ru

Received 23.04.2021 y.; received in final form 28.04.2021 y.

Abstract

The paper presents the results of studies carried out at the North State University at the site of the VIEESS department in order to determine the possibilities of increasing the output parameters of monosilicon photoelectric converters, as well as using them as measuring equipment to determine the transparency of substances used in solar installations.

Keywords: monosilicon photoelectric converters, solar collector, photovoltaic plate

Введение

С недавнего времени солнечные установки для выработки электроэнергии и получения тепла и горячей воды прочно вошли в наш быт.

Космические аппараты со своей измерительной аппаратурой просто немислимы без солнечных батарей, а различные здания в южных широтах все чаще обеспечиваются горячей водой и теплом при помощи гелиоколлекторов [1].

Множество гидрофизической техники с её совершенной аппаратурой имеет в качестве источников питания фотоэлектрические батареи (морские буи и другие автономные приборы). На удаленных метеостанциях (особенно в южных широтах) обеспечение обслуживающего персонала теплом и горячей водой осуществляется при использовании гелиоколлекторов. Солнечными коллекторами и фотоэлементами также обеспечивается и другая гидрофизическая и метеорологическая техника [6].

В данное время перед Россией стоит очень непростая задача – обеспечить своё население энергией, и при этом, по мере возможности, не загрязнять далее окружающую среду. Эту задачу можно уже сегодня решить, используя в энергетике нетрадиционные возобновляемые источники энергии, в частности фотоэлектрические и водонагревательные гелиоустановки.

Применение экологически чистых солнечных установок для выработки тепла и электроэнергии и замещение при этом традиционных видов топлив, загрязняющих атмосферу, оказывает неоценимую услугу окружающей среде [2].

Приборы, используемые при изготовлении установок, в частности для измерения прозрачности стекол могут применяться и для измерений в других областях промышленности.

Постановка цели исследования

Для обеспечения работы гелиоколлекторов и солнечных батарей используются защитные покрытия из всевозможных прозрачных материалов.

Прозрачность веществ напрямую сказывается на эффективности работы установок. Так, например, гелиоколлекторы обычно имеют одно, двух и трех стекольное покрытие, толщина стекла 2, 3, 4, а иногда 6 мм. Это делается для повышения его теплоизолирующих свойств. Солнечные коллекторы, могут иметь как стекольное, так и пленочное покрытие. Фотоэлектрические батареи имеют обычно покрытие из ламината, предохраняющее фотоэлементы от града, дождя, запыленности и других факторов. В космосе покрытие должно иметь ещё и защиту от радиационных воздействий. Естественно, чем больше света пропускает стекло, тем эффективнее работа установки. Однако, например, для гелиоколлекторов использование тонких стекол не решает вопрос термоизоляции их в холодную погоду, а для солнечных батарей ударостойкости, поэтому необходимо найти компромисс. Неоце-

нимую помощь в этом могут оказать измерительные приборы. Иногда требуется в очень короткий срок, например, при строительстве, оценить качество стекла, поэтому приборы должны быть простыми в использовании и не громоздкими (пример солнечный элемент). Чем удобны фотоэлектрические модули для измерений, так это своими размерами (площадь рабочей поверхности до 1 м²), т.е. прозрачность больших кусков стёкол можно измерять по всей площади с большой точностью. Целью нашего исследования было исследование и создание опытных образцов наиболее подходящих измерительных приборов, обладающих вышеуказанными характеристиками.

Нашей задачей ставилось определение пропускной способности солнечного света различными веществами, т.е. определение оптического КПД., коэффициента поглощения и других величин в инфракрасном, видимом и частично ультрафиолетовом диапазонах.

В качестве измерительных приборов были выбраны приборы на основе монокристаллического кремния. Это было сделано не случайно, а опираясь на исследования, проводимые такими известными людьми, как Ж.И. Алферов, М.М. Колтун, В.А. Грилихес [1]. Согласно проведенным ими исследованиям, можно утверждать, что спектральные зависимости коэффициентов поглощения в кремнии, показывают, что фотоэлектрические преобразователи на основе кремния, в отличие от других солнечных элементов (арсенид галлиевых и др.), могут преобразовывать в электрический ток большую часть солнечного спектра, т.е. излучения с длиной волны 1,1 мкм и короче [3].

Кремниевые солнечные элементы, предназначенные для энергетических целей и используемые как эталонные в обычных условиях, отличаются наиболее стабильными характеристиками из всех фотоэлектрических преобразователей [4]. Эти солнечные элементы обладают также линейной зависимостью тока короткого замыкания в довольно широком диапазоне изменения плотности потока излучения, их чувствительность охватывает видимую и ближнюю инфракрасную области спектра, а также ближнюю ультрафиолетовую область. В эталоне они работают в режиме короткого замыкания [5].

Результаты проведенного исследования

Как уже говорилось выше наш измерительный прибор представлял собой фотоэлектриче-

скую пластинку размером $0,5 \text{ см}^2$, тыльный и лицевой контакты которой были подсоединены к миллиамперметру. Для измерения инфракрасного излучения использовался фоторезистор. Вся лабораторная установка по определению прозрачности стекол (далее будем называть её УОПС) состоит из нескольких блоков, выполняющих отдельные функции.

Для изготовления УОПС используется цифровой мультиметр DT 830B, который необходим для измерения сопротивления фоторезистора. Фоторезистор является составляющей пары, второй частью которой является светоизлучающий диод инфракрасного свечения [8]. Две составляющие расположены на определённом расстоянии друг от друга. Это расстояние зависит от толщины испытываемого стекла и составляет от 30 до 5 мм.

Фоторезистор, облучаемый инфракрасным светодиодом, имеет зависимость сопротивления от интенсивности излучения [7]. Поэтому, при установки исследуемого материала между элементами пары, сразу видно, на сколько изменились показания мультиметра по сравнению с показанием, зафиксированным без установки исследуемого образца (то есть разницу, выражающуюся в цифровом значении). Получив данные измерения со стеклом и без него, мы можем легко вычислить разницу. Представив ее в процентах, мы можем вести подсчеты и ориентироваться в прозрачности стекла. При покупке, сортировке и входном контроле нам будет легко определять прозрачность, что существенно облегчит расчетные работы.

Способ построения схемы, предложенной в данной статье, является более простым и дешёвым, а значит более эффективным, чем использование в качестве фотоприемника фотодиода, требующего дополнительной схемы. Также предложенное схемное решение и конструкция является более удобной, и после небольшой доработки обычного мультиметра (при необходимости можно легко подсоединяется к нему). Мультиметр при этом не утрачивает своего прямого назначения, поэтому нет необходимости покупать дорогостоящее оборудование. Есть смысл использовать данное техническое решение на практике что является удешевлением монтажных работ и увеличением развития применения НИЭ. Электрическая схема УОПС представлена на рисунке 1.

Для того чтобы исключить зависимость интенсивности излучения светодиода VD 1 от напряжения питания, в схеме применён стабилизатор напряжения питания (микросборка DD 1

(КРЕН 5 А)). Для защиты светодиода от сверхтока используется ограничительный резистор R1, номиналом 1 кОм . Для измерения прозрачности стекла необходимо, чтобы мультиметр был включен на измерение сопротивления 2000 кОм . В зависимости от освещенности фоторезистора светодиодом устанавливается сопротивление (от 900 кОм до 2000 кОм) для данной схемы.

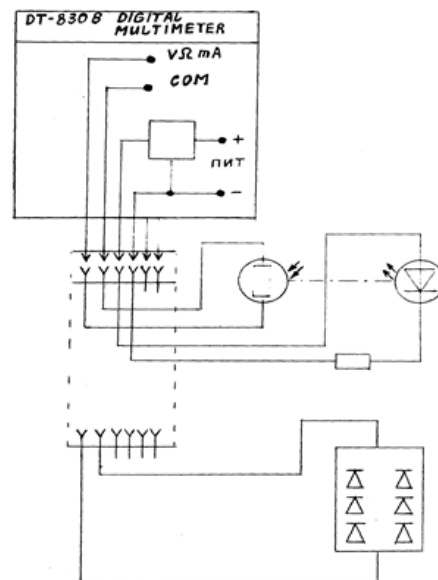


Рис. 1. Электрическая схема прибора (УОПС)

Исследования были проведены как с помощью прибора УОПС, так и при помощи фотоэлектрического модуля AXR-12, подключенного по такой же схеме (рис.2).

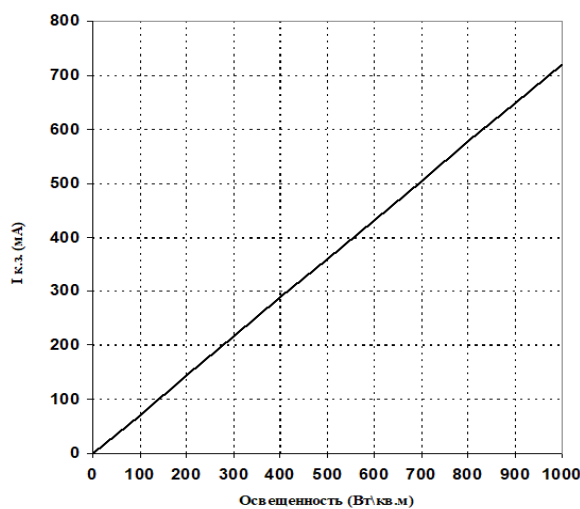


Рис. 2. Зависимость тока ($I_{кз.}$) от освещенности (Вт/м^2) (зависимость получена для фотоэлектрического модуля AXR-12)

Как видно на графике, изображенного на

рис.2 зависимость изменения тока короткого замыкания фотоэлектрического модуля прямо пропорциональна изменению плотности светового потока солнечной радиации (Вт/м^2), а, следовательно, изменению выходной мощности энергетической установки. Результаты исследований приводятся и в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. Пропускная способность различных материалов (данные получены при помощи прибора УОПС)

Материал	Показания миллиамперметра (мА)	Соответствующие значения освещенности (Вт/м^2)	Пропускная способность материала (%)
1. Стекло (6 мм)	8,77	677	75
2. Стекло (4 мм)	9,48	731	81
3. Стекло (3мм)	9,95	768	85
4. Полистирол (3-х слойный)	9,95	768	85
5. Полистирол (2-х слойный)	10,18	786	87
6. Поликарбонат (2-х слойный)	10,3	795	88
7. Стекло (2мм)	10,53	813	90
8. Полистирол (однослойный)	10,88	840	93
9. Поликарбонат (однослойный)	11	849	94
10. Оргстекло (4 мм)	11	849	94
11. Оргстекло (1 мм)	11,11	858	95
12. Без материала	11,7	903	100

При включении прибора на экране мультиметра появляется определенное значение сопротивления, при расчете необходимо от измеряемого сопротивления с учетом установленного образца отнять первоначальное показание прибора (без установленного образца), полученный

результат свидетельствует о пропускной способности стекла. За идеальную прозрачность берём показание прибора без экспериментального элемента.

Таблица 2. Пропускная способность различных материалов (данные получены при помощи фотоэлектрического модуля AXR-12)

Материал	Показания миллиамперметра (мА)	Соответствующие значения освещенности (Вт/м^2)	Пропускная способность материала (%)
Стекло (6 мм)	487	677	75
Стекло(4 мм)	526	731	81
Стекло (3мм)	552	768	85
Полистирол (3-х слойный)	552	768	85
Полистирол (2-х слойный)	565	786	87
Поликарбонат (2-х слойный)	572	795	88
Стекло (2мм)	585	813	90
Полистирол (однослойный)	605	840	93
Поликарбонат (однослойный)	611	849	94
. Оргстекло (4 мм)	611	849	94
. Оргстекло (1 мм)	617	858	95
. Без материала	650	903	100

Для исследований были взяты образцы стекла толщиной 3 мм, 4 мм, 6 мм, оргстекло толщиной 1 мм и 4 мм, полистирол однослойный и двухслойный (толщина 0,5 мм), поликарбонат прозрачный (толщина 1 мм), которые поочередно клались на рабочую панель фотоэлемента.

Также кроме солнечных элементов, можно использовать и фоторезисторы для измерения инфракрасного излучения (измерения инфракрасного излучения очень важны для гелиоколлекторов). Основное наше внимание было сосредоточено на приборах на основе монокремниевых фотоэлектрических преобразователей, результаты исследований, полученные с их помощью, мы привели в нашей работе.

Второй гелиоколлектор имел латунный абсорбер типа «труба в листе» с не зачернённой поверхностью. В качестве теплоносителя в гелиоколлекторе возможно использование, как прес-

ной воды, так и антифриза. Исследования проводились в апреле.

Выводы

Как видно из результатов исследований, возможность применения защитных покрытий для солнечных установок, особенно для фотоэлектрических модулей значительно ограничена качеством пропускной способности материала. Поэтому для таких установок наиболее рационально использовать материалы небольшой толщины малым коэффициентом пропускания в спектре работы преобразователя солнечной радиации в тепловую или электрическую энергию.

При использовании неподходящих типов защитных покрытий солнечных установок как фотопреобразователей, так и тепловых гелиоколлекторов, возможно значительное падение мощностных характеристик и как следствие низкая эффективность установок.

По результатам наших исследований можно говорить, что монокремниевые измерители солнечного излучения и оптического КПД на данный момент времени одни из наиболее эффективных приборов, которые реагируют даже на незначительное изменение освещенности. Все это делает возможным их дальнейшее применение и усовершенствование в качестве измерительной техники.

Список литературы

1. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергообеспечения 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.
2. 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.
3. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя/ Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горетский // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
4. 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.
5. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г.,

- Абейдуллин С.А. //Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
6. 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.
7. 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.
8. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, № 3, С. 153–158.

References

1. Vologdin S. V. Analiz razlichnykh scenariy 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, no. 3, pp. 153–158.

УДК 620.92

Некоторые результаты исследования характеристик тепловой гелиоустановки с фотоэлектрическим источником питания

И.Г. Жиганов¹, В.В. Кувшинов², Е.Г. Какушина³,
М.Ю. Сперанский⁴, А.А. Лавренчук⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹ZiganobI@mail.ru, ²kuvshinov.vladimir@gmail.com ³, little@mail.ru,
⁴MYSperanskiy@sevsu.ru, ⁵AALavrenchuk@sevsu.ru

Статья поступила 19.04.2021 г.; после доработки 21.04.2021 г.

Аннотация

В работе приведены некоторые результаты экспериментальных исследований тепловой солнечной установки с принудительной циркуляцией теплоносителя. В качестве источника питания для циркуляционного насоса использовались фотоэлектрические преобразователи. Приведенные в работе результаты экспериментальных исследований были получены с использованием оригинальных методик расчетов.

Ключевые слова: монокремниевые фото-электрические преобразователи, гелиоколлектор, фотоэлектрическая пластинка

Some results of the study of the characteristics of a thermal solar plant with a photovoltaic power source

I.G. Zhiganov¹, V.V. Kuvshinov², E.G. Kakushina³,
M.Yu. Speranskiy⁴, A.A. Lavrenchuk⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹ZiganobI@mail.ru, ²kuvshinov.vladimir@gmail.com ³little@mail.ru,
⁴MYSperanskiy@sevsu.ru, ⁵AALavrenchuk@sevsu.ru

Received 19.04.2021 y.; received in final form 21.04.2021 y.

Abstract

The paper presents some results of experimental studies of a solar thermal installation with forced circulation of the coolant. Photovoltaic converters were used as a power source for the circulation pump. The results of experimental studies presented in the work were obtained using original calculation methods.

Keywords: monosilicon photoelectric converters, solar collector, photovoltaic plate

Введение

Использование солнечной энергии для теплоснабжения коммунальных и промышленных объектов является одним из путей обеспечения энергетической безопасности Южных регионов России и занимает важное место в развитии нетрадиционной энергетики страны. Этому способствуют климатические условия, которые позволяют применять солнечные установки в лю-

бом регионе страны, наличие ресурсной и технологической базы, опыт эксплуатации достаточного количества экспериментальных гелиотехнических установок, имеющих вполне приемлемые сроки окупаемости [4].

Назрела реальная необходимость перехода от экспериментальных и демонстрационных установок к их массовому внедрению в практику коммунального, промышленного и сельскохозяйственного строительства. Это требует создания необходимой нормативно-методической

базы при соответствующем научно-техническом обосновании [5,6].

Невысокий термический потенциал солнечной энергетики определяет более высокие требования к эффективности систем солнечного теплоснабжения и к методам определения основных параметров эффективности как установок теплоснабжения в целом, так и главных элементов таких установок – плоских солнечных коллекторов.

Постановка цели исследования

По принятому в мировой гелиотехнической практике подходу к оценке эффективности работы солнечных коллекторов основными определяющими параметрами эффективности являются:

1. Коэффициентом тепловых потерь солнечного коллектора U_L Вт/ м² град, который предоставляет собой удельную потерю теплоты из коллектора на номинальном режиме за счет утечек теплоты через днище, боковые поверхности. Собственного излучения через верхнюю поверхность, Величина U_L определяет качество конструктивных и теплотехнических решений при разработке солнечного коллектора.
2. Коэффициент эффективности прямого ребра приемника солнечной энергии (абсорбера) – F , который определяет конструктивные и теплопередачные свойства теплопринимающей поверхности абсорбера.
3. Коэффициент эффективности коллектора F' , который определяет эффективность принятых решений для трубной системы солнечного коллектора вместе с абсорбером, отнесенную к разности температур пластин абсорбера (T_n) и окружающей среды (T_a).
4. Коэффициент отвода теплоты из коллектора F_R , который определяет эффективность переноса теплоты от поверхности абсорбера к теплоносителю отнесенную к разности температур входа воды в коллектор (T_i) и окружающей среды (T_a) в номинальном режиме.
5. Полезная тепловая энергия Q_u (Вт/м²) солнечного коллектора, определяемая из уравнений теплового баланса коллектора в номинальном режиме.
6. Мгновенный коэффициент полезного действия коллектора (установки), определяемый в данный момент времени с учетом ме-

теорологических и эксплуатационных условий.

Для определения характеристик эффективности необходимо знать составляющие теплового баланса плоского коллектора (ПСК) в выбранном режиме работы, из анализа которого очевидно, что полезная энергия, отводимая из коллектора в данный момент времени – это разность количества солнечной энергии, поглощенной абсорбером (пластиной) коллектора, и количества энергии, теряемой в окружающую среду [7]. Уравнение, которое применимо для расчета почти всех существующих конструкций плоского коллектора, имеет вид:

$$Q_u = F_R A [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (1)$$

где: Q_u - полезная энергия, отводимая из коллектора в единицу времени, Вт;

A – площадь коллектора, м²;

F_R – коэффициент отвода теплоты из коллектора;

I_T – плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости коллектора (с учетом углового коэффициента R), Вт/м²;

τ – пропускательная способность прозрачных покрытий по отношению к солнечному излучению;

α – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению;

U_L – полный коэффициент тепловых потерь коллектора, Вт/(м² град);

T_i – температура жидкости на входе в коллектор, °С (на номинальном режиме);

T_a – температура окружающей среды, °С.

Основные идеи теоретического анализа уравнения (1) подробно изложены в [1,2,3] и являются основой для принятия проектных решений при создании новых типов солнечных коллекторов.

Уравнения удобно для расчета и анализа солнечных энергетических систем, поскольку полезная энергия коллектора определяется по температуре жидкости на входе (T_i). Однако потери тепла в окружающую среду (U_L) зависят от средней температуры поглощающей пластины (абсорбера), которая всегда выше температуры на входе, т.к. жидкость нагревается, проходя через коллектор. Расчет коэффициентов F_R , U_L , (τ , α), входящих в уравнение (1) довольно сложен и

возможен при допущениях, снижающих достоверность полученных результатов [1].

Проще и надежнее определять основные параметры эффективности коллектора экспериментально на стендах, оборудованных соответствующей измерительной техникой. Условия опытов должны соответствовать реальным условиям работы коллектора [8]. В процессе испытаний тщательно измеряют следующие параметры: плотность потока падающей солнечной радиации I_T , температуру наружного воздуха T_a , расход жидкости через коллектор G , температуру жидкости на входе и выходе из коллектора T_i , T_o . Полезная энергия коллектора тогда определяется выражением:

$$Q_u = AGC_p(T_o - T_i)(\text{Вт}), \quad (2)$$

где: A – полезная площадь коллектора (м^2);

G – удельный массовый расход теплоносителя ($\text{кг}/\text{м}^2 \text{с}$);

C_p – теплоемкость теплоносителя ($\text{Дж}/\text{кг К}$);

T_o – температура теплоносителя на выходе из коллектора;

T_i – температура теплоносителя на входе;

Плотность потока, падающей на коллектор солнечной радиации I_T ($\text{Вт}/\text{м}^2$), определяется при помощи прямых измерений или же по статистическим метеорологическим данным для широты Севастополя: $I_T = I_o R$, где I_o ($\text{Вт}/\text{м}^2$) – плотность потока солнечной радиации в данный момент на горизонтальную поверхность, R – угловой коэффициент. Обе эти величины для каждого часа можно найти в справочной литературе.

По результатам фактических измерений определяется эффективность коллектора – среднеинтегральный, за каждый час к.п.д. коллектора:

$$\eta_i = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{Q_u}{AI_o R} = \frac{q_u}{I_o R} \quad (3)$$

где q_u – удельная полезная мощность коллектора ($\text{Вт}/\text{м}^2$).

Параметры, которые входят в формулу (2), измеряются через определенный интервал времени (через час).

Ранее мы показали (1), что режим работы и эффективность коллектора, по сути, определяется тремя параметрами F_R , U_L , (τ, a) . Коэффициент F_R слабо зависит от температуры и может рассматриваться как постоянная, для данной конструкции коллектора, величина. Режимные

изменения U_L и G также почти не влияют на величину F_R .

Полный коэффициент потерь U_L – зависит от температуры, однако для стационарного режима U_L можно считать величиной постоянной.

При определении приведенной поглощательной способности необходимо учитывать следующее. Испытания коллекторов проводят, как правило, в ясные дни (примерно в полдень), либо в помещениях с применением солнечного имитатора. В обоих случаях диффузная составляющая радиации мала, а падающее излучение – близко к нормальному к поверхности коллектора. Тогда значение приведенной поглощательной способности (τ, a) соответствует прямой нормальной радиации $(\tau, a)_n$, т.е. может рассматриваться как не зависящая от направления излучения, а значит – как постоянная величина за время измерений (при углах падения прямого излучения менее 45°).

При принятых допущениях раскроем уравнение (3) для мгновенного к.п.д. с учетом уравнения (1):

$$\eta = \frac{Q_u}{AI_T} = \frac{F_R AI_T (\tau a) - F_R AU_L (T_i - T_a)}{AI_T}$$

$$\eta = F_R (\tau a) - \frac{F_R U_L (T_i - T_a)}{I_T} \quad (4)$$

При условии $U_L = \text{const}$ выражение (4) приобретает вид линейной зависимости: $\eta = a - bx$, где параметр:

$$x = \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (5)$$

При этом угловой коэффициент прямой “ b ” равен $(-F_R U_L)$, а координата точки пресечения с вертикальной осью составляет: $a = F_R (\tau a)$.

Эта наиболее удобная форма представления экспериментальных данных, поскольку значения $(-F_R U_L)$, $F_R (\tau a)$ сами по себе достаточно информативны и используются в расчетах долгосрочных характеристик систем солнечного теплоснабжения. Типичные данные для коллекторов с жидким теплоносителем показаны на рис. (1).

Важнейшими характеристиками, определяющими наклон этой прямой и положение точки пересечения с осью ординат, являются число прозрачных покрытий и оптические свойства абсорбера.

Наиболее достоверные данные по эффективности плоских солнечных коллекторов (ПСК) различных типов и конструкций можно получить в результате испытаний образцов ПСК на экспериментальных стендах, проводимых по

изложенной выше методике.

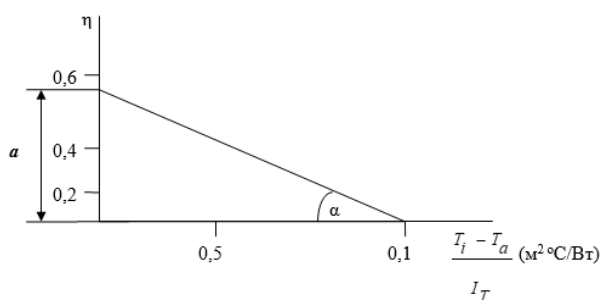


Рис. 1. Определение коэффициента эффективности плоского солнечного абсорбера f-методом

Описание установки и результаты экспериментов

На кафедре ВИЭСС в мае-июне 2020 года были проведены исследования на экспериментальной установке с целью отработки методики испытаний солнечных коллекторов, определения основных показателей эффективности исследуемого плоского солнечного коллектора.

Схема экспериментального стенда и его внешний вид представлены на рис.2,3.

В состав стенда входят:

- плоский солнечный коллектор;
- бак-аккумулятор со встроенным теплообменником змеевикового типа;
- насос принудительной циркуляции с электроприводом;
- фотоэлектрическая батарея для обеспечения работы насоса принудительной циркуляции (тип ISM-50);
- измерительная система, состоящая из 10 термодатчиков, фиксирующих параметры теплоносителя и температуру поля ПСК;
- измерителя расхода по контуру теплоносителя (водомер);
- термоэлектрический измеритель плотности потока солнечного излучения.

С точки зрения классификации гелиотехнических источников энергии стенд моделирует установку солнечного горячего водообеспечения (УСГВ) с принудительной циркуляцией с автономным фотоэлектрическим источником электрической энергии, в качестве которого используется фотоэлектрический модуль типа ISM-50 производства ОАО «ММК им.Ильича», мощностью 50 Вт при номинальном напряжении $U_{ном} = 17,0$ В и токе $I_{ном} = 3,0$ А.

Исследовался плоский солнечный коллектор типа «лист-труба», трубная система и абсор-

бер – алюминиевые, габаритные размеры коллектора: 1,6 х 0,55 м х 0,1 м, площадь – 0,88 м², имеет одностекольное защитное покрытие. Насос с принудительной циркуляцией погружного типа, размещается в корпусе бака-аккумулятора, работает от фотоэлектрического источника энергии.

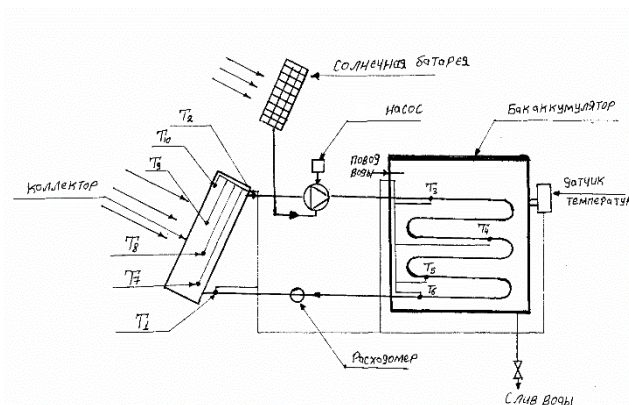


Рис. 2. Гелиоколлекторная установка с солнечной батареей.

На рисунке 2 показано расположение термодатчиков (термосопротивлений), где:

T_1 – температура на входе в солнечный коллектор;

T_2 – температура на выходе из солнечного коллектора;

T_3, T_4, T_5, T_6 – температура в баке-аккумуляторе;

T_7, T_8, T_9, T_{10} – температура пластины солнечного коллектора;



Рис. 3. Гелиоколлекторная установка с солнечной батареей.

Рис.3. Установка в работе (территория кафедры «ВИЭСС» Севастопольского государственного университета, Института ядерной энергии и промышленности).

Эксперименты проводились с 11.00 до 15.00, измерения температур теплоносителя и расхода (объемным способом) производились через 15-30 минут после установления стационарного состояния в каждый момент измерения. Значения плотности потока солнечного излучения приняты по статистическим данным метеорологического справочника Украины для июня месяца и 45° с.ш. Полученные данные пересчитаны на положение ПСК с углами $\beta = 45^\circ$ по формуле:

$$I_T = I_0 R, \text{ (Вт/м}^2\text{)} \quad (6)$$

R – угловой коэффициент, общий для прямого и диффузного излучений (определен по справочным таблицам в зависимости от времени, широты места и угла установки ПСК ($R=0,82$)).

Расчетные значения Q_n , I_T параметра x приведены в таблице 1.

Результаты экспериментов представлены в виде линейной зависимости $\eta = f(x)$ на рис.4.

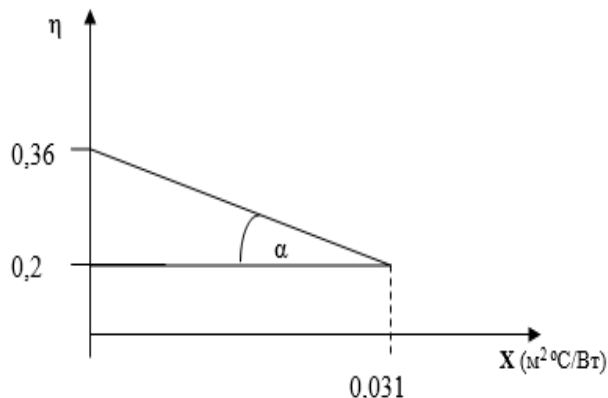


Рис. 4. Определение коэффициента эффективности исследуемой установки

Тангенс угла наклона прямой в соответствии с уравнением (4) представляет собой производные параметров $|F_R U_L| = 0,16/0,031 = 5,16$ (Вт/м² град). Отрезок по оси ординат представляет произведение $F_R (\tau\alpha)_n$, равное 0,36 (фактический к.п.д. ПСК). Эти данные определяют эффективность коллектора, при дальнейшем анализе полученных нами экспериментальных данных можно определить значение оптического к.п.д. $(\tau\alpha)$ и коэффициента тепловых потерь U_L .

Рассчитав значение коэффициента $F_R = 0,685$ получим:

$$(\tau\alpha)_n = \frac{0,36}{0,685} = 0,525, U_L = \frac{5,16}{0,685} = 7,53 \text{ (Вт / м}^2\text{град)}$$

1. В результате исследований получены основные характеристики исследуемого плоского солнечного коллектора: F_R , U_L , $(\tau\alpha)$.
2. Экспериментальный стенд и испытания ПСК на нем по предложенной методике могут быть использованы для определения параметров эффективности ПСК экспериментальным методом.
3. Все вышеуказанные исследования в конечном итоге помогут в производстве более эффективных солнечных установок, с высоким сроком службы.

Таблица 1. характеристики исследуемого плоского солнечного коллектора

параметр	1	2	3
T_1 °C	22,5	29,6	34,2
T_2 °C	28	34,7	39,7
T_3 °C	22	22	22
G (кг/с)	0,0092		
C_p (Дж/ кг К)	4190		
$Q_u = GC_p (T_2 - T_1)$	212	193	212
I_T (Вт/м ²)	677	700	700
η	0,36	0,27	0,29
$x = \frac{(T_i - T_a)}{I_T}$	0,00075	0,012	0,016
Время суток	11.00	12.00	13.00

Выводы

Определение эффективности теплового солнечного коллектора предложенным методом позволяет на достаточно высоком уровне находить наиболее значимые его энергетические характеристики и позволяет определять качество преобразования потока солнечной радиации в тепловую энергию плоским абсорбером данной установки.

Использование фотоэлектрического модуля для электрического питания циркуляционного насоса позволяет независимо от внешних факторов работы электрических сетей достаточно надежно обеспечивать работу солнечной установки.

Комбинированное использование фотоэлектрических преобразователей и теплового гелиоколлектора позволяет увеличить эффективность

работы всей солнечной системы.

Список литературы

1. Харченко Н.В. Индивидуальные солнечные установки М: Энергоатомиздат, 1991.
2. Даффи Д. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. /У.Бекман //М.Мир, 1977г.
3. 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.
4. Лосева И.Г. Оценка динамики снижения мощности источников нетрадиционной и возобновляемой электроэнергии (СЭС, ВЭС, далее - ВИЭ). Использование величины снижения мощности в качестве нормативного возмущения. / Перышкин М.Д., Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Небесный В.В.// Энергетические установки и технологии - 2020. Т. 6. № 4. С. 51-56.
5. Авакян М.К. Методы решения глобальной условной оптимизации применительно к энергетическим системам / Авакян М.К., Перышкин М.Д., Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Соломонович А.В.// Энергетические установки и технологии - 2020. Т. 6. № 4. С. 38-41.
6. 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.
7. 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.
8. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153–158.

References

1. Kharchenko N. V. Individual solar installations M: Energoatomizdat, 1991.
2. Duffy D. Thermal processes with the use of solar energy. Mir, 1977.
3. Vologdin S. V. Analiz razlichnykh scenariy 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.
4. Loceva I. G. Evaluation of the dynamics of reducing the power of sources of unconventional and renewable electricity (SES, WPP, hereinafter-RES). The use of the value of the reduction in the power of renewable energy sources as a normative perturbation. / Peryshkin M. D., Kakushina E. G., Reshetnikova T. V., Heavenly V. V. / / Power installations and

- technologies-2020. Vol. 6. No. 4. pp. 51-56.
5. 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.
6. 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. S. 90-93.
7. 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.
8. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, no. 3, pp. 153–158.

УДК 620.92

Использование возобновляемых источников для обеспечения энергетических систем припортовых сооружений г. Севастополя

И.С. Ивантеев¹, Н.М. Шайтор², В.В. Кувшинов³, А.М. Олейников⁴, Р.А. Нашев⁵
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹ivantyeyev@gmail.com, ²shaytor1950@mail.ru, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com,
⁴oma091041@gmail.com, ⁵bo_zemlya_zdoroviya@mail.ru

Статья поступила 26.04.2021 г.; после доработки 28.04.2021 г.

Аннотация

В работе рассматривается вопрос об использовании альтернативных источников электроэнергии в портовых сооружениях. Оценивается их направление и потенциал применительно для государственного унитарного предприятия «Севастопольский морской порт». Требования по электроснабжению к портовым сооружениям. Рассматриваются концепции развития отрасли обстановке.

Ключевые слова: альтернативные источники, Севастопольский морской порт

The use of renewable sources for the provision of energy systems of port facilities in Sevastopol

I.S.Ivantyeyev¹, N.M. Shaytor², V.V.Kuvshinov³, A.M. Oleynikov⁴,
A.R. Nashev⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹ivantyeyev@gmail.com, ²shaytor1950@mail.ru, ³kuvshinov.vladimir@gmail.com, ⁴oma091041@gmail.com, ⁵bo_zemlya_zdoroviya@mail.ru

Received 26.04.2021 y.; received in final form 28.04.2021 y.

Abstract

The paper deals with the use of alternative sources of electricity in port facilities. Their direction and potential are evaluated in relation to the state unitary enterprise "Sevastopol Sea Port". Power supplies are requirements for port facilities. The concepts of the development of the tourism industry are considered.

Keywords: alternative sources, Sevastopol sea port

Введение

Энергия на сегодняшний день играет ключевую роль в развитии и существования современной жизни человечества. Она сопровождает нас повсюду в том или ином виде, и проникла во все сферы жизнедеятельности человека, начиная от обогрева и приготовления пищи до выхода в открытый космос.

В свете такой мировой ситуации, актуальную роль стала приобретать развитие нетрадиционных источников энергии и повышение энергоэффективности существующих технологий

[1]. Наглядное проявление этого ярко иллюстрируется, в повсеместной жизни эволюцией технологией освещения (от лампочек накаливания к светодиодному освещению). Активное использование и развитие получили такие направления, как использование энергии солнца, ветра и воды. Наглядным примером является Дания, где 60% выработки электроэнергии приходится на нетрадиционные источники энергии. Электроэнергия на настоящий момент дню носит универсальный характер, одновременно являясь: благом, товаром как для населения, так и заграничного сегмента (рычагом влияния на международной

сцене) так необходимой составляющей развития регионов, так и страны в целом [3].

Одним из таких регионов является Севастополь. Вследствие, геополитической ситуации, существовала проблема с электроэнергетическим обеспечением города так и Крыма в целом. Решением проблемы дефицита электроэнергии было создание 2х ГТЭС. Однако это никак не отразилось на состоянии электросетей и средств автоматизации, также неоднозначно остается вопрос наличия мощностей для дальнейшего развития региона и Севастополя.

Предприятия города, у которых потребления электричества является жизненно важным условием существования, напрямую зависят от ее достаточного наличия. Кроме того, тарифная сетка на электроэнергию неуклонно растет. Одним из таких предприятий является Государственное унитарное предприятие «Севастопольский морской порт». В связи с этим, повышение энергоэффективности предприятия является важным элементом повышения рентабельности.

Примерами такими мероприятиями могут выступать: замена морально устарелого оборудования на современное более экономичное, использование нетрадиционных источников энергии. Использование энергии солнца, воды и ветра являются перспективными направлениями для обеспечения портовых сооружений электроэнергией.

Постановка целей и методы исследования

Актуальность исследования заключается в изучении потенциала использования нетрадиционных источников энергии для обеспечения собственных нужд предприятия.

Цель исследования – повышение эффективности, надежности и бесперебойности электроснабжения портовой инфраструктуры, включая компьютерные системы управления судов и портовой навигации, системы обеспечения перевалкой и хранением грузов, системы энергоснабжения судов у стенки.

Способы достижения цели – применение источников гарантированного и бесперебойного электроснабжения, резервирование электропитания от различных подстанций и источников, использование дизель-электрических и солнечных электростанций, систем накопления электроэнергии.

Предмет исследования – электроснабжение

морской портовой инфраструктуры г. Севастополя.

Объект исследования – перспективные направления реконструкции электроснабжения портов г. Севастополя.

В качестве методов исследования был проведен:

- теоретический анализ технической, справочной, экономической литературы по теме исследования.
- изучение технической и регламентной литературы
- анализ современных достижений в области нетрадиционных и возобновляемых источников энергии.

Результаты исследований

Оценка солнечного потенциала одного квадратного метра

На сегодняшний день, несмотря на разнообразие различной литературы, публикаций, в большинстве своем расчет солнечной станции (как в литературе, так и среди коммерческих компаний, предоставляющие услуги по продаже и установке) сводится к определению количества фотоэлектрических панелей исходя из предполагаемой нагрузки [4].

Данный подход применим лишь к идеализированным условиям, так как при расчетах величина солнечной радиации берется стандартной 1000Вт/м, без учета влияния различных внешних факторов [7].

Очевидно, что необходимо иметь более точную методику расчета или практические замеры на месте будущей установки. Однако, существуют давно разработанные, стандартизированные, апробированные и применяемые на практике методы расчета, к примеру «Методы расчета теплопоступления в здание от проникающей радиации».

Суть которых состоит в определении суммарной солнечной радиации на произвольно ориентированную поверхность, что также подходит для расчетов СЭС с условием учета спектрального распределения энергии.

Воспользуемся вышеуказанной методикой и справочными данными, с помощью которых проведем расчет по месяцам.

В итоге расчета, мы получим приблизительную величину солнечной радиации, ввиду того что некоторые значения коэффициентов будут недоступны и приняты с погрешностью, их значение возможно определить лишь на месте уста-

новки или при наличии проектной документации. При расчете примем следующую терминологию [2].

Солнечная радиация - энергетическая освещенность (облученность или

поверхностная плотность потока излучения), создаваемая электромагнитным

излучением, поступающим от Солнца, атмосферы и земной поверхности, единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м², часовые и суточные суммы в МДж/м².

Прямая солнечная радиация S - энергетическая освещенность, создаваемая излучением, поступающим от диска Солнца, единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м², часовые и суточные суммы в МДж/м².

Рассеянная солнечная радиация D - энергетическая освещенность, создаваемая рассеянным в атмосфере и отраженным от земной поверхности солнечным излучением, поступающим из телесного угла, за исключением телесного угла, ограниченного солнечным диском, единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м², часовые и суточные суммы в МДж/м².

Общая (суммарная) солнечная радиация I - сумма прямой и рассеянной

солнечной радиации, единицы измерения: мгновенное значение в кВт/м², часовые и суточные суммы в МДж/м². При расчете примем следующие условия:

- расчет приводим для города Севастополь по данным полученным на метеорологической станции Никитского сада.
- панели наклонены под углом 45° к горизонту
- панели сориентированы в южном направлении
- солнечные панели изготовлены на основе кремния
- пренебрегаем зависимостью выработки энергии фотоэлектрическими панелями от температуры. Формула для определения суммарной солнечной радиации с учетом облачных и безоблачных дней:

$$I_j^{\text{гор}} = d_{\text{я}} \left(S_{\text{я}}^{\text{гор}} \times K_{\text{ГВJ}} + \frac{D_{\text{я}}^{\text{гор}}}{2} + \frac{I_{\text{я}}^{\text{гор}} \times A_k}{200} \right) + d_{\text{обл.}} \left(S^{\text{гор}} \times K_{\text{ГВJ}} + \frac{D^{\text{гор}}}{2} + \frac{I^{\text{гор}} \times A_k}{200} \right) \quad (1)$$

где $d_{\text{обл.}}$ - количество облачных дней в месяц, по месяцам начиная с января.

$d_{\text{я}}$ - количество безоблачных дней в месяц,

по месяцам начиная с января.

$S_{\text{гор}}$ - прямая солнечная радиация, на горизонтальную поверхность при ясном небе. $I_{\text{ягор}}$ - суммарная прямая солнечная радиация, на горизонтальную поверхность при ясном небе.

A_k - альbedo подстилающей поверхности в процентах.

$S_{\text{гор}}$ - прямая солнечная радиация, на горизонтальную поверхность при средней облачности. $I_{\text{гор}}$ - суммарная прямая солнечная радиация, на горизонтальную поверхность средней облачности.

$K_{\text{ГВJ}}$ - коэффициенты для пересчета средних суточных норм прямой солнечной радиации с горизонтальной поверхности на наклонную 45° для южной ориентации панелей.

$D_{\text{ягор}}$ - рассеянная солнечная радиация, на горизонтальную поверхность при ясном небе.

$D_{\text{гор}}$ - рассеянная солнечная радиация, на горизонтальную поверхность при средней облачности.

Проведя расчет согласно формуле, получим величину суммарной солнечной радиации за месяц, по месяцам в МДж/м²:

Переведем в кВт/м² на суточную величину при этом, получаем:

Следует понимать, что не вся энергия будет преобразована, ввиду того что полученные величины характеризует весь спектр электромагнитного излучения, в то время как солнечные панели преобразуют лишь часть этого излучения с длиной волны до 1100 нм [5].

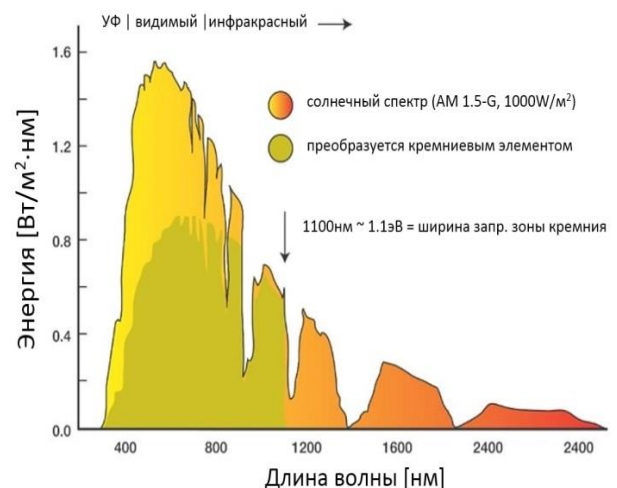


Рис. 1. Спектр поглощения коммерческими солнечными панелями.

На рисунке 1 показан схематический спектр,

солнечного излучения достигающего поверхности земли, грязно-зелёным цветом указана часть спектра, который может поглощать кремниевый солнечный элемент и переводить его в электричество.

Поэтому от рассчитанной энергии по формуле (1.0) 70% проходит преобразования солнечными панелями. Стоит отметить, что КПД панелей достигает до 23%. Учтя это, получаем значения энергии в кВт, которое может выработать кремневая панель размером 1м² за сутки, помесечно, начиная с января:

Январь –0,62 кВт; Февраль–0,79 кВт; Март–0,95 кВт; Апрель–1,06 кВт; Май–1,09 кВт; Июнь–1,1 кВт; Июль–1,06 кВт; Август–1,05 кВт; Сентябрь–1,02 кВт; Октябрь–0,91 кВт; Ноябрь –0,72 кВт; Декабрь– 0,53 кВт.

Исходя из полученных данных, с уверенностью можно сказать, что при проектировании СЭС следует учитывать, неравномерность значения солнечной радиации от времени года и размеры территорий для планируемой СЭС.

Основные положения концепции построения системы системам бесперебойного электроснабжения

Для электрических сетей общего назначения Российской Федерации характерно низкое качество электрической энергии - отключения, высокочастотный шум, отклонения частоты, провалы напряжения и др. [6].

Согласно заключению Государственного центра метрологического обеспечения, в области электромагнитной совместимости (ГЦМО ЭМС), требования ГОСТ 13109-87 к показателям качества электрической энергии (ПКЭ) энерго-снабжающими и энергораспределяющими организациями, как правило, не выполняются. Кроме того, требования по качеству электроэнергии, установленные в ГОСТ, зачастую недостаточно высоки в отношении современного телекоммуникационного оборудования.

Очевидно, что подключение к реально существующим электрическим сетям высокотехнологического оборудования, чувствительного к ухудшению качества электрической энергии (компьютеров, активного оборудования вычислительных сетей, телекоммуникационной аппаратуры, банковского и офисного оборудования), связано не только с повышенным риском нарушения функционирования, но и выхода данного оборудования из строя [8].

В этих условиях установка статических ис-

точников бесперебойного питания (ИБП), работающих в режиме "on-line" (двойного преобразования), как средства получения электроэнергии требуемого качества, является необходимой предпосылкой обеспечения устойчивой работы компьютерного и телекоммуникационного оборудования. Кроме того, для современного оборудования характерно применение импульсных блоков питания с нелинейным характером потребления.

Использование мощных трехфазных ИБП с двойным преобразованием для питания такого рода оборудования является оптимальным, поскольку позволяет избежать перегрузок нейтральных кабелей входных электросетей и оборудования трансформаторных подстанций.

Мощные ИБП структуры "on-line" являются основой построения систем гарантированного энергоснабжения (СГЭ) и обеспечивают качественную работу подключенной к ним нагрузки как в штатном режиме (при наличии электропитания на входе), так и в автономном режиме (при отключении входной сети электропитания) за счет энергии, накопленной в аккумуляторных батареях.

Необходимым результатом, достигаемым при реализации СГЭ, можно считать обеспечение возможности функционирования ответственного оборудования при отказе стационарного ввода (вводов) электропитания в течение времени, достаточного для переключения на резервный источник электропитания или нормального завершения основных рабочих процессов в компьютерных сетях [9].

Целью системы гарантированного энергоснабжения (СГЭ) является обеспечение высококачественного бесперебойного электропитания ответственных потребителей как в нормальных условиях, так и в случаях нарушения штатного энергоснабжения вследствие аварий или ухудшения его качества в условиях промышленных или иных помех.

Построение систем гарантированного энергоснабжения для комплекса потребителей, территориально расположенных более чем на одном этаже, и, тем более, в нескольких зданиях, может производиться по различным схемам.

В настоящее время наибольшее распространение получили две основные структуры СГЭ - централизованная и распределенная (локализованная). Централизованная система содержит один ИБП, к которому подключены все ответственные потребители.

В распределенной системе каждый потреби-

тель (или группа локальных потребителей) запитывается от отдельного (локального) ИБП.

Учкуевка

Территория причала возле пляжа Учкуевки, причал №277. Данная территория ввиду наличия скопления баз отдыха исключает возможность установки ВЭУ на суше, однако наличие якорных стоянки №386 позволяет рассмотреть ее как потенциальную территорию для установки ВЭУ.

Солнечная энергия (возможная территория), исходя из снимков, имеет потенциал как обеспечения собственных нужд, в случае энергосберегающего освещения и офисного оборудования. Интерес представляет, волновой потенциал, на рисунке 3, отчетливо видна волновая активность.

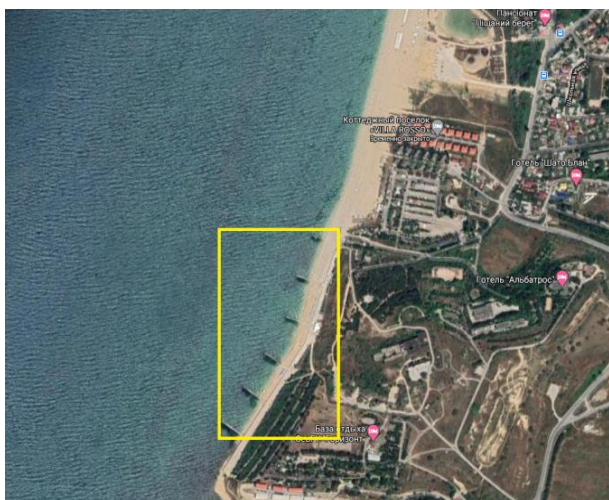


Рис. 3. Снимок территории причала возле пляжа Учкуевки.

Величина этого потенциала требует дальнейшего анализа с целью оценки энергообеспечения собственных нужд и возможности работы с отдачей энергии в сеть, а также следует рассмотреть возможность создания гибридной ЭС – солнечно-волновой-ветровой (при этом необходимо установить систему накопления энергии). Анализ для ВЭС следует проводить по 3 типам конструкции (буй, осциллирующий водяной столб, водяной змей).

Севастопольская бухта

Севастопольская бухта закрыта с моря молами, вследствие этого она не может обладать достаточным волновым потенциалом, поэтому ее рассмотрение с точки зрения альтернативных источников электроэнергии не целесообразно.

Мола Севастопольской бухты не входят в производственные мощности ГУПГС «Севастопольский морской порт», поэтому установка Ветровой ЭУ не целесообразна ввиду того, что находятся вблизи Инкермана.

Однако на территории имеются открытые складские площадки, которые можно использовать под солнечные панели, выделенные красным цветом рисунок 2.



Рис. 2. Снимок Севастопольской бухты/ Инкерман.

В этом случае предпочтительно соорудить крытые площадки, чтобы не терять складские площади, а солнечные панели разместить на их крыше.

Также следует поместить системы накопления электроэнергии, для электропотребления собственных нужд (компьютерные системы управления судов и портовой навигации, системы обеспечения перевалкой и хранением грузов, системы энергоснабжения судов у стенки) или отдачи в сеть.

Камышовая бухта

Камышовая бухта является наиболее интересным вариантом для внедрения технологий альтернативных источников энергии.

Наличие в портовом владении моллов позволяет рассматривать их как источник волновой энергии по принципу осциллирующий водяной столб. Само наличия моллов говорит о волновой активности, что дает основания для рассмотрения технологий по принципу водяного буя.

Наличие значительной территории, а также крыши и фасады зданий, позволяет рассматривать территорию также как источник солнечной

энергии. Якорная стоянка №389 является потенциальной возможностью для Ветровой ЭУ.



Рис. 4. Снимок бухты Камышевая

Все это вместе дает основание оценивать Камышевую бухту как место для создания гибридной электростанции с условием установки системы накопления энергии.

Исходя из сложившейся геополитической обстановки, неопределенности с дальнейшей судьбой морского порта, имея ввиду судоремонтную, транспортную, промысловую отрасль. Трудно определить перспективное направления в области развития НИЭ в Севастополе. Финансовые вложения в развитие МПС напрямую зависят от разрешения геополитической ситуации, а значит и вложения в НИЭ для нужд МПС также от нее также зависят. А поскольку в обозримом будущем, разрешения не предвидится, то в вопросах финансирования НИЭ можно полагаться на собственные возможности МСП и единичные гранты.

В этом случае, более реальные проекты будут связаны с энергией солнца. Волновое и ветровое направление будет целесообразно рассматривать в условиях улучшения финансового климата, ввиду дорогостоящих вложений в разработку, строительство и обслуживание ВЭС. Вследствие различий протяженности береговой черты, инфраструктуры, назначения и состава производственных мощностей основных участков морского порта, реконструкция электроснабжения должна производиться индивидуально

для каждого участка, с учетом упомянутых особенностей. Рассматривая возможности энергии солнца, необходимо оценить энергопотенциал одного квадратного метра, для дальнейших предварительных расчетов.

Вывод

Исследование возможности реконструкции электроснабжения морской портовой инфраструктуры показало, что ГУПГС "СМП" имеет большую протяженность морского побережья и состоит в основном из шести основных участков: Южный участок побережья, Камышовая бухта, Севастопольская бухта, Южная бухта, Балаклава, Учкеевка. По своим свойствам участки значительно отличаются друг от друга протяженностью, рельефом, инфраструктурой, назначением и составом производственных мощностей. Ввиду того что система электроснабжения не является единой электрической системой то каждый участок рассматривался отдельно друг от друга с учетом своих особенностей. Проанализированы перспективы работы и развития СМП в целом. Определены возможные пути решения экономических проблем ГУПГС "СМП". Рассмотрены особенности ЭС на основе НИЭ. Анализ показал, что можно выделить следующие участки как наиболее перспективные для создания гибридной ЭС: Учкеевка, Камышовая бухта, Севастопольская бухта в районе Инкермана. Определены группы потребители для питания от гибридной ЭС [10].

Разработана принципиальная электрическая схема гибридной ЭС, основываясь на современных направлениях в развитии НИЭ, и открытой информации ГУПГС "СМП". Рассчитан и приведен ориентировочный электроэнергетический потенциал для солнечных панелей по месяцам на один квадратный метр.

Список литературы

1. Шайтор Н.М. Проблемы и перспективы развития электроэнергетики Крымского полуострова. В сборнике: Инновации и наука: проблемы и перспективы, сборник статей Международной научно-практической конференции. 2017. С 315-321.
2. Гуш Ю.В. Волновая энергетика – перспективный сектор возобновляемых источников энергии /Статья - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2016.С.32-35
3. Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Софийский И.Ю. Энергетические установки на основе воз-

- обновляемых источников энергии – Учебное пособие М.: Изд-во Спутник, 2018. С.180-230.
4. Денисова В.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии – учебное пособие/Ростов: Феникс, 2015. С.125-135.
 5. Клеутин В.И., Руппель А.А. Задачи системы электроснабжения судна от береговой сети - Статья/Омск, Сибирский государственный университет водного транспорта: Омск, 2016 С.3
 6. Истратов Р.А. Повышение эффективности управления перегрузочными процессами в морском порту- Автореферат диссертация/ Мурманский государственный технический университет: Мурманск, 2015. С.4-7.
 7. Лукутин Б.В., Муравлев И.О., Плотников И.А. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями / Изд-во Томского политехнического университета: Томск, 2015. С.6-10.
 8. Оптимизация аккумулирования энергии в гибридных системах ветроэнергетики и фотовольтаики / Л. М. Абдали, Ф. М. Аль-Руфай, Б. А. Якимович, В. В. Кувшинов // Вестник ИЖ ГТУ имени М. Т. Калашникова. 2020. Т. 23, № 2. С. 100–108.
 9. Технико-экономические аспекты развития автономных солнечных энергетических систем / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В., Кузнецов П.Н., Соломенникова С.И.//Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 4. С. 55-60.
 10. Лукутин Б.В., Обухов С.Г. Силовые преобразователи в электроснабжении- Учебное пособие/Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2007. С.139-142
- ment of transshipment processes in the Seaport-Abstract dissertation / Murmansk State Technical University: Murmansk, 2015. С.4-7.
7. Lukutin B. V., Muravlev I.O., Plotnikov A. I. Power System with wind and solar power plants / publishing house of Tomsk Polytechnic University, Tomsk: Tomsk, 2015. P. 6-10.
 8. Optimization of energy storage in a hybrid system of wind energy and fotovoltaic / Abdali L. M., al-Rufai F. M, Yakimovich B. A., Kuvshinov V.V., // Vestnik Izhtu named M. T. Kalashnikova. 2020. Vol. 23, no. 2. pp. 100-108.
 9. Technical and economic aspects of the development of autonomous solar energy systems / Kakushina E. G., Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., Kuznetsov P. N., Solomennikova S. I. / / Power Installations and Technologies. 2018. Vol. 4. no. 4. pp. 55-60.
 10. Lukutin B. V., Obukhov S. G. Power converters in power supply - Textbook/Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publishing House, 2007. pp. 139-142

References

1. Shaytor N. M. Problems and prospects of development of the electric power industry of the Crimean Peninsula. In the collection: Innovations and science: problems and prospects, a collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. 2017. Pp. 315-321.
2. Gush Y.V. Wave energy is a promising renewable energy sources /Article - Saint-Petersburg: Saint-Petersburg Polytechnic University of Peter the Great, 2016. pp.32-35
3. Kuvshinov V.V., Morozova N.V., So-fiskiy I. Y. Power plant based on renewable energy –Study-guide. M.: Izd-vo Sputnik, 2018. pp.180-230.
4. Denisova V. V. Nontraditional and renewable energy sources-a training manual/Rostov: Feniks, 2015. pp. 125-135.
5. Kleutin V. I., Ruppel A. A. Problems of the ship's power supply system from the coastal Network-Article/Omsk, Siberian State University of Water Transport: Omsk, 2016 pp.3
6. Istratov R. A. Improving the efficiency of manage-

УДК 620.4, 528.7

Использование беспилотных летательных для мониторинга и диагностики солнечных электростанций

Д.Ю. Котельников¹, П.Н. Кузнецов²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹DYKotelnikov@ya.ru, ²PNKuznetsov@sevsu.ru

Статья поступила 11.05.2021 г.; после доработки 13.05.2021 г.

Аннотация

В статье представлено решение для автоматизированного мониторинга оборудования промышленных солнечных электростанций. Решение основано на использовании беспилотного летательного аппарата со специализированной полезной нагрузкой и наземной интеллектуальной информационно-управляющей системой для обнаружения загрязненных и затененных фотоэлектрических модулей. Для выполнения процедур обнаружения использовалась нейронная сеть на основе архитектуры Fast R-CNN с алгоритмом обучения – Inception v2 (COCO). Используя эту нейронную сеть, можно идентифицировать затененные фотоэлектрические модули в ясный день с точностью более 94%.

Ключевые слова: солнечные электрические станции, беспилотный летательный аппарат, повышение энергоэффективности, диагностика, мониторинг

Use of unmanned aerial vehicles for monitoring and diagnostics of solar power plants

D.Y. Kotelnikov¹, P.N. Kuznetsov²Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹DYKotelnikov@ya.ru, ²PNKuznetsov@sevsu.ru

Received 11.05.2021 y.; received in final form 13.05.2021 y.

Abstract

The article presents a solution for automated monitoring of industrial solar power plant equipment. The solution is based on the use of an unmanned aerial vehicle with a specialized payload and a ground-based intelligent information and control system to detect contaminated and shaded photovoltaic modules. To perform the detection procedures, a neural network based on the Fast R-CNN architecture with the learning algorithm – Inception v2 (COCO) was used. Using this neural network, it is possible to identify shaded photovoltaic modules on a clear day with an accuracy of more than 94%.

Keywords: solar power stations, unmanned aerial vehicle, energy efficiency improvement, diagnostics, monitoring

Введение

На сегодняшний день мировая энергетика признала необходимость и эффективность солнечных электрических станций (СЭС) в производственном цикле электрической энергии.

Использование солнечной энергетики требует оптимизации последовательности преобразования и поддержания рабочих характеристик фотоэлектрических модулей. Характеристики

модулей подвержены воздействию факторов различной природы, от не качественных материалов и нарушения технологии установки самих модулей, до загрязнённости, дефектов и повреждений их поверхностей. Загрязнённость поверхности фотоэлектрических модулей влечёт за собой уменьшение энергетической эффективности всей СЭС ввиду рассогласования по напряжению в точках максимальной мощности. В

связи с этим возникает необходимость систематического мониторинга состояния поверхности модулей, а также их диагностики [1].

Использование систем мониторинга фотоэлектрических модулей позволяет оптимизировать работу путем своевременного реагирования на изменение их нормального состояния. Кроме того, системы и инструменты мониторинга позволяют проводить анализ данных, сравнение, обнаружение и идентификацию неисправностей [2]. Системы мониторинга должны быть в состоянии постоянно отслеживать рабочее состояние модулей, расположенных на территории электростанции, чтобы поддерживать их оптимальные условия работы.

В настоящее время не представлено готовых решений для автоматического мониторинга и диагностики состояния фотоэлектрических модулей без непосредственного вмешательства в работу каждого из них, а самыми распространёнными решениями являются:

1. Визуальный осмотр поверхности фотоэлектрических модулей персоналом СЭС. Данное решение является одним из первых и самых распространённых способов решения проблемы мониторинга фотоэлектрических модулей. На текущий момент является устаревшим ввиду больших затрат времени на обход территории СЭС, не точным из-за воздействия человеческого фактора, а также влечёт за собой необходимость в содержании дополнительного обслуживающего персонала [3].
2. Установка комплекса датчиков в каждое параллельно соединённое объединение фотоэлектрических модулей (стринг). Решение основано на постоянном мониторинге электрических параметров. Для его реализации некоторые производители предлагают устанавливать необходимое оборудование непосредственно на заводе в объединения фотоэлектрических модулей (стринги). Ввиду большого количества модулей (СЭС «Перово» – 440 000 шт.) расположенных на территории электростанции, данное решение является очень затратным [4].
3. Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для фотофиксации поверхности фотоэлектрических модулей и последующей ручной обработкой полученных данных. Решение является одним из новшеств в сфере диагностики и мониторинга СЭС, но существенно теряет в своей эффективности из-за наличия человеческого фак-

тора, а также необходимости содержать дополнительный персонал.

Большинство доступных методов мониторинга сильно зависят от измерений и анализа характеристик системы в условиях ее функционирования, таких как измерение напряжения, тока, мощности [5], которые в некоторых случаях не дают понимания реального рабочего состояния системы (напри-мер, в случае частичного затенения). Поэтому системы мониторинга по-прежнему слепы к различным дефектам, которые требуют специального резервирования, обнаружения и идентификации. Кроме того, эти методы во многих случаях требуют комплексного анализа данных для вывода состояния фотоэлектрической системы [6], что влечёт за собой траты на установку дополнительных датчиков, схемную и конструкторскую переконфигурацию СЭС.

Частичное затенение считается одним из наиболее серьезных недостатков из-за вредного воздействия, которое может оказать на фотоэлектрические модули. Для обнаружения данной проблемы были использованы различные методы, основанные на анализе электрических [7] и не электрических параметров [8]. Одним из инструментов для прогнозирования мощности, моделирования и оценки производительности фотоэлектрических модулей являются искусственные нейронные сети [9–11]. Нейронные сети показали свою эффективность в солнечной энергетике, а также в других сферах жизни [12–14], ввиду чего, авторами было принято решение использовать их для мониторинга оборудования промышленных солнечных электростанций.

Таким образом, для решения задачи мониторинга и диагностики состояния фотоэлектрических модулей авторами предлагается использовать автоматизированный комплекс с системой детектирования повреждений и степени загрязнения фотоэлектрических модулей, основанной на методах нейросетевой классификации и машинном зрении в совокупности с беспилотным летательным аппаратом.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка автоматизированного комплекса для диагностики и мониторинга состояния фотоэлектрических модулей, базирующегося на использовании беспилотных летательных аппаратов, методах нейросетевой классификации и технологиях машинного зрения для решения проблемы мониторинга и диагностики промышленных солнечных

электростанций.

Создание автоматизированного комплекса сопряжено с решением следующих многоуровневых последовательных задач:

1. Исследование методов мониторинга и диагностики фотоэлектрических модулей за счёт использования развитых нейросетевых технологий и машинного зрения.
2. Создание обучающей выборки на основе реальных данных, полученных на промышленных солнечных электростанциях и в лаборатории «Солнечная энергетика» кафедры «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета.
3. Создание интерактивной карты солнечной электростанции для отображения выявленных, в результате нейросетевого анализа, дефектов фотоэлектрических модулей.
4. Создание автоматизированного комплекса диагностики и мониторинга фотоэлектрических модулей на основе беспилотного летательного аппарата.

Принцип работы автоматизированного комплекса

Принцип работы предлагаемого автоматизированного комплекса можно описать с помощью функциональной блок-схемы (рис. 1).

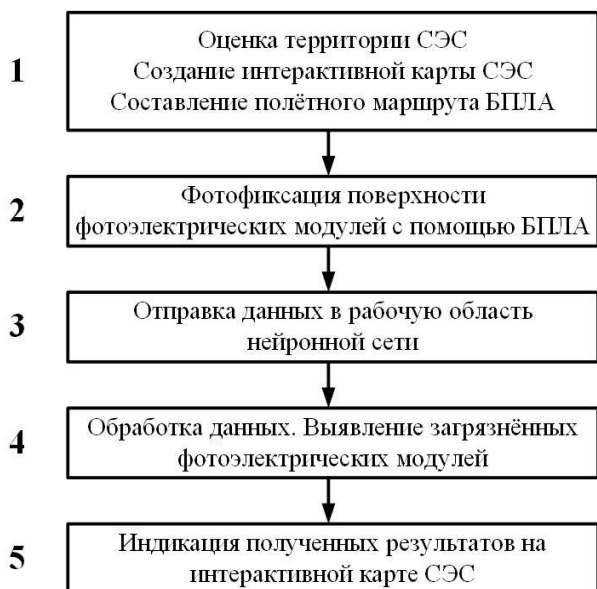


Рис. 1. Функциональная блок-схема, описывающая принцип работы автоматизированного комплекса.

Работу функциональной блок-схемы (рис. 1)

можно описать следующим алгоритмом:

1. Оценка территории СЭС. Создание интерактивной карты СЭС. Составление полётного маршрута БПЛА. Для начала работы автоматизированного комплекса, необходимо оценить топологические особенности территории, занимаемой СЭС, снять координаты фотоэлектрических модулей для создания интерактивной карты СЭС, а также составить оптимальный полётный маршрут для БПЛА, покрывающий всю требуемую территорию. В случае, если будет использовано несколько БПЛА – разделить всю покрываемую зону на отдельные сектора и разделить их между аппаратами.
2. Фотофиксация поверхности фотоэлектрических модулей с помощью БПЛА. После составления оптимального полётного маршрута начинается процедура облёта БПЛА отведённого для него сектора с фотофиксацией поверхности фотоэлектрических модулей.
3. Отправка данных в рабочую область нейронной сети. Результатом фотофиксации поверхностей модулей будут являться файлы с данными, которые необходимо предварительно обработать, а затем внести в рабочую область предварительно обученной нейронной сети.
4. Обработка данных. Выявление загрязнённых модулей. Благодаря технологиям машинного зрения и нейросетевым алгоритмам будут определены все загрязнённые фотоэлектрические модули, расположенные на территории СЭС.
5. Индикация полученных результатов на интерактивной карте СЭС. После окончания процедуры обработки данных, все полученные результаты будут отражены на интерактивной карте СЭС, представляющей собой схему станции с отображёнными на ней фотоэлектрическими модулями.

Автоматизированный комплекс для мониторинга и диагностики фотоэлектрических модулей предназначен для использования на солнечных электростанциях не зависимо от их мощности и занимаемой площади с целью увеличения их энергоэффективности.

Преимущества предлагаемого автоматизированного комплекса заключаются в оперативном отслеживании состояния фотоэлектрических модулей, минимизации воздействия на процесс сбора данных человеческого фактора и затраченного на осмотр времени, создании деталь-

ного журнала с перечнем обследованных фотоэлектрических модулей и их состояния.

Помимо этого, следует отметить, что каждое последующее обследование позволит существенно увеличить точность анализа не только на текущей солнечной электростанции, а и на других станциях, использующих данный автоматизированный комплекс, ввиду увеличения количества данных, анализируемых с помощью нейросетевых методов.

При изменении настроек машинного зрения, вышеуказанный комплекс возможно использовать для обнаружения дефектов в иных сферах, например: выявление повреждений лопастей ветроэлектрических установок, кровли больших сооружений, таких как футбольные стадионы или крупные цеха предприятий.

Также, после перенастройки, данный комплекс возможно использовать для построения карты распределительных сетей путём облёта территории и обнаружения типовых для разного класса напряжения опор и снятия их координат.

Для реализации автоматизированного комплекса диагностики и мониторинга фотоэлектрических модулей был выбран беспилотный летательный аппарат коптерного типа FIMI X8 SE (рис. 2).



Рис. 2. Квадрокоптер FIMI X8 SE

Достоинствами квадрокоптера FIMI X8 SE являются:

бесколлекторный тип двигателей, что позволяет существенно увеличить его надёжность и срок активного использования, встроенная камера с разрешением 12 МП (съёмка Quad HD 2716x1524 пикселей 60 к/с, фото - 4000x3000 пикселей) при невысокой стоимости.

Также данный аппарат имеет трёхосевой механический подвес, выполняющий роль стабилизатора для улучшения качества фото и плавности видео, что является важным для решения задач, связанных с техническим зрением.

Обработка входных данных

Для реализации нейросетевых алгоритмов и применения машинного зрения необходимо составить обучающую выборку из фото фотоэлектрических модулей, их характерных дефектов, поломок и загрязнений (рис. 3).



Рис. 3. Примеры фото из обучающей выборки

Для реализации процедуры машинного зрения была выбрана свёрточная нейронная сеть Fast R-CNN с архитектурой Inception v2 (COCO). Процедуру обучения можно представить в виде функциональной блок-схемы (рис. 4).

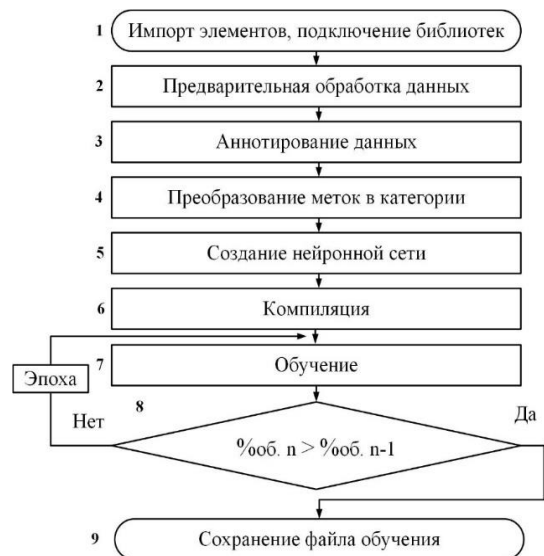


Рис. 4. Функциональная блок-схема процедуры обучения нейронной сети

Для обучения нейронной сети были использованы библиотеки TensorFlow, Keras, OpenCV, Numpy. TensorFlow и OpenCV реализуют алгоритмы машинного обучения и машинного зрения, Библиотека Keras необходима для регулирования процесса обучения, а Numpy – для работы с большими массивами данных и матрицами. После подключения необходимых библиотек фото из обучающей выборки приводятся к единому размеру и формату. Для обучения

нейронной сети распознаванию определённых объектов, проводится аннотирование фото, то есть выполняется разметка областей фото, на которых изображены фотоэлектрические модули. Для разметки был использован инструмент LabelImg.

После проведения процедуры аннотирования, создаются файлы с переменными, уникальными цифровыми кодами «понятными» для нейронной сети. Далее идёт – создание самой нейронной сети, путём последовательного добавления необходимых слоёв, проверка сети на ошибки и сам процесс обучения, во время которого важно не дать нейронной сети переобучиться. После окончания процесса обучения следует сохранение файла с оптимальным количеством эпох, который необходим для дальнейшей работы.

После того, как нейронная сеть была обучена, можно приступать непосредственно к детектированию фотоэлектрических модулей (рис. 5).



Рис. 5. Пример результатов детектирования фотоэлектрических модулей

Как видно из данных, представленных на рис. 3, нейронная сеть успешно детектировала фотоэлектрические модули различного типа на тестовых изображениях, при этом точность составила 96% и более.

Следующим шагом является обнаружение затенённых (тени от элементов опорных конструкций, других модулей и т.д.), загрязнённых (птичий помёт, снег и т.д.) поверхности фотоэлектрических модулей (рис. 6).

Как видно из данных, представленных на рис. 6, нейронная сеть успешно обнаружила загрязнения и затенения поверхности фотоэлектрических модулей. Точность обнаружения составляет 94% и более, а для её повышения достаточно увеличить количество фото в обучающей

выборке.

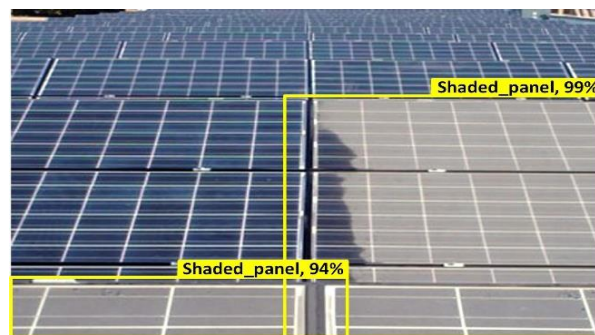


Рис. 6. Пример результатов детектирования затенённых фотоэлектрических модулей

Выводы

Таким образом, автоматизированный комплекс позволит оперативно отслеживать состояние фотоэлектрических модулей, расположенных на территории СЭС, минимизировать воздействие человеческого фактора и затраченного времени. Техничко-экономические расчёты внедрения данного решения на солнечных электростанциях, показывают, что использование предлагаемого комплекса позволит увеличить их энергетическую эффективность на 2%.

Работа была выполнена при поддержке «Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» (Фонда содействия инновациям), договор 16339ГУ/2021.

Список литературы

1. Ciani L. Design and implementation of a onboard device for photovoltaic panels monitoring / L. Ciani, L. Cristaldi, M. Faifer, M. Lazzaroni, M. Rossi // Proceedings of the 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). – 2013, P. 1599–1604.
2. Nunes Pereira A. Architecture of information system for monitoring of photovoltaic plants / A. Nunes Pereira, P. Tome, P.M. Costa, J. Pascoal // Proceedings of the 2014 Ninth Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI). – 2014, P. 1–6.
3. Кузнецов, П.Н. Устройство удаленного мониторинга электрических параметров солнечной электростанции / П.Н. Кузнецов, А.А. Лавренчук, Л.Ю. Юферев // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2018. – № 5-1 – С. 37–42.
4. Заголило С.А. Перспективы использования солнечной энергетики в децентрализованных энерго районах Крайнего Севера / С.А. Заголило, А.С.

- Семёнов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований, 2015. – № 11-3. – С. 333-336.
5. Spataru S. Diagnostic method for photovoltaic systems based on light I–V measurements / S. Spataru, D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu // *Solar Energy*. – 2015. – Vol 119. P. 29–44.
 6. Chine W. A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks / W. Chine, A. Mellit, V. Lughi, A. Malek, G. Sulligoi, A.M. Pavan // *Renewable Energy*. – 2016. – Vol 90. P. 501–512.
 7. Kim K.A. Photovoltaic AC parameter characterization for dynamic partial shading and hot spot detection / K.A. Kim, P.T. Krein, G.-S. Seo, B.-H. Cho // *Proceedings of the 2013 Twenty Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. – 2013, P. 109–115.
 8. Ramspeck K. In-line thermography for reliable hot spot detection and process control / K. Ramspeck, S. Schenk, D. Duphorn, A. Metz, M. Meixner // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol 55. P. 113–140.
 9. Mellit A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: a review / A. Mellit, S.A. Kalogirou // *Prog. Energy Combust.* – 2008. – Vol 34. P. 574–632.
 10. Mellit A. Artificial neural network-based model for estimating the produced power of a photovoltaic module / A. Mellit, S. Saglam, S.A. Kalogirou // *Renewable Energy*. – 2013. – Vol 60. P. 71–78.
 11. Velilla E. Performance evaluation of two solar photovoltaic technologies under atmospheric exposure using artificial neural network models / E. Velilla, J. Valencia, F. Jaramillo // *Solar Energy*. – 2014. – Vol 107. P. 260–271.
 12. Котельников, Д.Ю. Прогнозирование динамики энергопотребления города Севастополя при использовании нейросетевых алгоритмов / Д. Ю. Котельников, П. Н. Кузнецов, В. В. Кувшинов, Б. А. Якимович, А. М. Олейников // *Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова*. – 2021. – Т. 24. – № 1. – С. 78–86. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-78-86.
 13. Кузнецов, П. Н. Развитие нейросетевых технологий цифровой трансформации городской среды для идентификации несанкционированного скопления отходов / П. Н. Кузнецов, Д.Ю. Воронин, В.П. Евстигнеев, Д.Ю. Котельников // *Менеджмент XXI века: социально-экономическая трансформация в условиях неопределенности: сборник научных статей по материалам XVIII Международной научно-практической конференции*. Санкт-Петербург. – 2020. – С. 330 – 334.
 14. Кузнецов, П. Н. Методика нейросетевого прогнозирования энергопотребления для устойчивого развития умной городской среды / П. Н. Кузнецов, Д. Ю. Котельников, Д. Ю. Воронин // *Электронный научный журнал «Дневник науки»*. – 2020. – № 5
- ## References
1. Ciani L. Design and implementation of a onboard device for monitoring photovoltaic panels / L. Ciani, L. Cristaldi, M. Faifer, M. Lazzaroni, M. Rossi // *Proceedings of the 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. – 2013, p. 1599-1604.
 2. Nunes Pereira A. Architecture of information system for monitoring of photovoltaic plants / A. Nunes Pereira, P. Tome, P. M. Costa, J. Pascoal // *Proceedings of the 2014 Ninth Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*. – 2014, p. 1-6.
 3. Kuznetsov, P. N. Device remote monitoring the electrical parameters of the solar power plant / P. N. Kuznetsov, A. A., Lavrenchuk, L. S. Yuferev, *International journal of applied and fundamental research*, 2018. No. 5-1 – S. 37-42.
 4. Headers S. A. prospects of solar energy in a decentralized governmental areas of the far North / S. A. Headers, A. S. Semenov, *international journal of applied and fundamental research*, 2015. No. 11-3. – P. 333-336.
 5. Spataru S. Diagnostic method for photovoltaic systems based on light I–V measurements / S. Spataru, D. Sera, T. Kerekes, R. Teodorescu // *Solar Energy*. – 2015. – Vol 119. P. 29–44.
 6. Chine W. A novel fault diagnosis technique for photovoltaic systems based on artificial neural networks / W. Chine, A. Mellit, V. Lughi, A. Malek, G. Sulligoi, A.M. Pavan // *Renewable Energy*. – 2016. – Vol 90. P. 501–512.
 7. Kim K.A. Photovoltaic AC parameter characterization for dynamic partial shading and hot spot detection / K.A. Kim, P.T. Krein, G.-S. Seo, B.-H. Cho // *Proceedings of the 2013 Twenty Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. – 2013, P. 109–115.
 8. Ramspeck K. In-line thermography for reliable hot spot detection and process control / K. Ramspeck, S. Schenk, D. Duphorn, A. Metz, M. Meixner // *Energy Procedia*. – 2014. – Vol 55. P. 113–140.
 9. Mellit A. Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: a review / A. Mellit, S.A. Kalogirou // *Prog. Energy Combust.* – 2008. – Vol 34. P. 574–632.
 10. Mellit A. Artificial neural network-based model for estimating the produced power of a photovoltaic module / A. Mellit, S. Saglam, S.A. Kalogirou // *Renewable Energy*. – 2013. – Vol 60. P. 71–78.
 11. Velilla E. Performance evaluation of two solar photovoltaic technologies under atmospheric exposure using artificial neural network models / E. Velilla, J. Valencia, F. Jaramillo // *Solar Energy*. – 2014. – Vol 107. P. 260-271.
 12. Kotelnikov, D. Y. prediction of the dynamics of energy consumption of the city of Sevastopol when using neural network algorithms / D. Y. Kotelnikov,

- P. N. Kuznetsov, V. V. Kuvshinov, B. A. Yakimovich, A. M. Oleynikov // Vestnik Izhtu named after M. T. Kalashnikova. - 2021. - Vol. 24. - No. 1. - pp. 78-86. DOI: 10.22213/2413-1172-2021-1-78-86.
13. Kuznetsov, P. N. Development of neural network technologies of digital transformation of the urban environment for identification of unsanctioned waste accumulation / P. N. Kuznetsov, D. Yu. Voronin, V. P. Evstigneev, D. Yu. Kotelnikov // Management of the XXI century: socio-economic transformation in conditions of uncertainty: a collection of scientific articles based on the materials of the XVIII International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg. - 2020. - p. 330-334.
 14. Kuznetsov, P. N. Methodology of neural network forecasting of energy consumption for sustainable development of smart urban environment / P. N. Kuznetsov, D. Yu. Kotelnikov, D. Yu. Voronin // Electronic scientific journal "Diary of Science". - 2020. - № 5.

УДК 620.92

Модель использования возобновляемой энергетики в курортно-рекреационной системе Республики Крым

В.В.Кувшинов¹, Е.Г. Какушина², Б.А. Якимович³, С.И. Соломенникова⁴,
А.К. Стаценко⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com ²little@mail.ru, ⁵Stacenko@mail.ru

Институт природно-технических систем, ул. Марата, 6,
г. Севастополь, 299011, Россия, ³yakimovich52@gmail.com

ФГБОУ ВО «Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова»
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, 426069, Россия

⁴S_Solomennikova@mail.ru

Статья поступила 17.05.2021 г.; после доработки 18.05.2021 г.

Аннотация

В статье рассматривается модель раздела по оценке энергетической эффективности систем с использованием возобновляемых источников энергии в рекреационном комплексе принципиальным является учет средних, минимальных и максимальных значений солнечной энергии

Ключевые слова: экологически чистые системы, водонагревательные системы, возобновляемая энергетика

Model of renewable energy use in the resort and recreational system of the Republic of Crimea

V.V. Kuvshinov¹, E.G. Kakushina², B.A. Yakimovich³,
S.I. Solomennikova⁴, A.K. Statsenko⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,

¹kuvshinov.vladimir@gmail.com ²little@mail.ru, ⁵Stacenko@mail.ru

Institute of Natural and Technical Systems, 6 Marata st., Sevastopol, 299011, Russia,

³yakimovich52@gmail.com

Izhevsk state technical University named after M. T. Kalashnikov, 3 Studencheskaya str., Izhevsk, 426069, Russia

⁴S_Solomennikova@mail.ru

Received 17.05.2021 y.; received in final form 18.05.2021 y.

Abstract

The article considers the model of the section on the assessment of the energy efficiency of systems with the use of renewable energy sources in the recreational complex. The principle is to take into account the average, minimum and maximum values of solar energy

Keywords: eco-friendly systems, water heating systems, renewable energy

Введение

Учитывая рекреационную специализацию многих регионов Крыма, было рассмотрено использование солнечной энергии в здравницах,

гостиницах и домах отдыха.

Высокий потенциал солнечной энергии в АРК позволяет широко применять как тепло-энергетическое, так и фотоэнергетического оборудования практически на всей территории [1].

В качестве потребителя, для которого создается информационно-аналитическая база данных региона о возможных вариантах компоновки и уровне эффективности индивидуальных систем горячего водоснабжения на основе солнечной энергии, определен субъект малого предпринимательства в сфере рекреации (отдыха, туризма). При этом учитывалось, что в регионе за последние 3 года отмечен значительный прирост реконструкции существующих и строительства новых объектов рекреационной сферы – порядка 14-18% в год [2]. Для таких рекреационных объектов характерны:

- ✓ во-первых, сезонность работы - наибольшая загрузка отмечается в период «июнь – август», то есть наиболее теплый, солнечный период на территории полуострова,
- ✓ во-вторых, объективная необходимость создания и эксплуатации индивидуальных систем горячего водоснабжения (возможно в технологически допустимых пределах в ряде случаев эксплуатация и системы отопления), поскольку данные объекты в существующие коммунальные системы не могут быть подключены из-за имеющихся проблем в таких службах практически во всех населенных пунктах.

Кроме того, в Крыму есть также территории, где не развита система централизованного газоснабжения и теплоснабжения. Для них использование солнечного электро- и теплоснабжения очень перспективно. Следует учесть также возможности повышения имиджа крымских объектов отдыха для отдыхающих из высокоразвитых стран, в которых борьба за экологически чистые производства является нормой ведения бизнеса.

Постановка цели исследования

Остановимся на принципиальных положениях, которые реализованы при разработке модели внедрения и развития возобновляемой энергетики в рекреационном комплексе:

1. При построении в модели раздела по оценке энергетической эффективности систем с использованием возобновляемых источников энергии в рекреационном комплексе принципиальным является учет средних, минимальных и максимальных значениях солнечной энергии. В данной задаче речь идет о количестве поступающей солнечной радиации с учетом естественной климатической и природной сезонной и суточной изменчивости. Нормативная оценка ресурсов солнечной энергии с позиций учета научно-обоснованных уровней солнечной инсоляции

разрабатывалась еще для территории РФ и в последние годы потребовалась конкретизация современных показателей. Требуемые картографические оценки количества поступающей солнечной радиации для отдельных населенных пунктов Крыма (на основе среднемесячных актинометрических данных, а также данных о температуре, влажности воздуха и скорости ветра).

2. К рассмотрению и оценке могут приниматься различные компоновки водонагревательных систем, но на первом этапе разработки расчетных схем приняты простейшие солнечные водонагревательные установки, ориентированные на индивидуальных потребителей с суточным потреблением в зависимости от номерного фонда при 100 литрах горячей воды в сутки, которой достаточно для удовлетворения минимальных бытовых потребностей семьи из 2–3 человек, принимаемой на отдых в 1 номере.

Такие установки сегодня находят наибольшее распространение в мире среди частных пользователей. Установка включает в себя в качестве основных компонентов солнечный коллектор, водяной бак-аккумулятор и теплоизолированные трубопроводы, обеспечивающие их гидравлическую связь [3]. В дневное время при наличии солнечного излучения вода нагревается в солнечном коллекторе и за счет естественной или принудительной циркуляции поступает в бак-аккумулятор, откуда вновь направляется в солнечный коллектор для дальнейшего нагрева [5]. Стандартные средства автоматики при недостаточном для нагрева воды в солнечном коллекторе потоке солнечного излучения прекращают циркуляцию воды в контуре и возобновляют ее, если поток солнечного излучения достаточен для нагрева воды. В течение светового дня вода из бака-аккумулятора, как правило, несколько раз проходит через солнечный коллектор, нагреваясь до максимальной температуры.

Усредненный КПД системы в расчетах принят - 0,6 (по среднему уровню производителей установок, которые заявлены в техническом паспорте), минимальная температура поступающей к нагреву воды принята на контрольном уровне $t^0 = 10^\circ\text{C}$. При температуре 37°C водой уже ощущается как теплая, что присутствует в нормативных документах по горячему водоснабжению, но в расчете заложена температура воды после нагрева $-t^0 = 40^\circ\text{C}$, т.е. прирост температуры должен быть обеспечен $+30^\circ\text{C}$.

Солнечный коллектор считается ориентированным на юг с углом наклона к горизонту приблизительно равным широте местности. Бак-ак-

кумулятор считается хорошо теплоизолированным, а вода в нем хорошо перемешанной (температурная стратификация отсутствует). Важным фактором при моделировании СВУ является суточный график потребления нагретой воды. В настоящем исследовании для упрощения анализа предполагается, что разбор нагретой воды осуществляется после обеда и в вечернее время. К следующему утру бак полностью опорожняется и заполняется водопроводной водой с температурой 10°C [4].

Была определена стоимость оборудования и монтажа установленного варианта схемы горячего водоснабжения в ценах фиксированных периодов времени на территории Крыма [8].

3. В качестве варианта для сравнения экономической эффективности систем с использованием возобновляемых источников энергии принята широко распространенная схема горячего водоснабжения рекреационных объектов – электронагревательный бойлер на 1 номер. При этом рассчитывалась стоимость создания данной системы (приобретение и монтаж оборудования и сетей) и учет эксплуатационных расходов на оплату электроэнергии в ценах различных периодов времени [7].

4. Обобщающим показателем экономической эффективности систем горячего водоснабжения для рекреационных предприятий принят срок окупаемости расходов на их создание. При его расчете учитывался получаемый (прогнозный) чистый доход от осуществления деятельности по обслуживанию рекреантов с учетом сложившихся в регионе и отдельных его рекреационных зонах (городах, населенных пунктах) ценах на услуги проживания в номере с удобствами (горячее водоснабжение – душ) среднего уровня комфортности и уровня рентабельности бизнеса. Использованы официальные данные Министерства курортов и туризма АР Крым за 2005-2008 гг., а результаты пилотного обследования рекреационных объектов малого бизнеса в районах Б. Ялты, г. Алушты, г. Судак, г. Саки, пгт. Черноморское. Указанные зоны Крыма имеют высокие показатели солнечной инсоляции, которые отличаются по уровню, что и учитывалось при расчетах возможных схем нагрева воды для нужд объекта. Кроме того, в названных рекреационных зонах отмечены различия в заполняемости объектов рекреации, ценах на рекреационные услуги и уровнях рентабельности услуг.

5. При выполнении расчетов для отдельных пунктов получены данные для анализа срока окупаемости затрат на внедрение двух вариантов

системы горячего водоснабжения для объектов малого бизнеса в сфере рекреации (табл. 1).

Таблица 1. Исходные параметры расчета

Количество человек	100	чел	
Норма воды на человека	100	л/чел дн	
Температура холодной воды	15	°C	
Температура горячей воды	45	°C	

Количества тепла для 100 чел при 100 л/чел дн рассчитывалась исходя из теплоемкости носителя и составило 349 кВт ч.

Потребность в энергии на 100 чел в 1 день при 100 л/чел дн при условии 10 % потерь находилась как:

$$P_{\text{преобр}} = Q + P_{\text{пот}} = 384 \text{ кВт ч}, \quad (1)$$

В качестве реперных точек полуострова брались Ялта, Алушта, Судак, Саки и Черноморское, т.е. основные рекреационные районы Крыма.

Таблица 2. Резюмирующая выборка из базы данных по параметрам солнечной радиации бралась в виде матрицы ккал/м²

	Ялта	Алушта	Судак	Саки	Черноморское
год	1250000	1250000	1250000	1200000	1200000
июль	180000	180000	180000	185000	185000
декабрь	30000	30000	27500	27500	17500

В результате расчета было получено распределение преобразованной мощности по регионам (табл. 3).

Таблица 3. Распределение преобразованной мощности по регионам

	Ялта	Алушта	Судак	Саки	Черноморское
год	872,25	872,25	872,25	837,36	837,36
июль	125,6	125,6	125,6	129,1	129,1
декабрь	20,9	20,9	19,2	19,2	12,2

И соответственно рассчитаны рабочие площади коллекторов, необходимых для покрытия

тепловой нагрузки минипансионатов или частных гостиниц в мм² (табл. 4).

Таблица 4. Рабочие площади коллекторов

	Ялта	Алушта	Судак	Саки	Черноморское
Год	160,72	160,72	160,72	167,42	167,42
Июль	91,74	91,74	91,74	89,26	89,26
декабрь	550,42	550,42	600,46	600,46	943,58

Полученные данные по коллекторным системам сравнивались с подобного рода электронагревательными бойлерами. С качеством расчетов брались недорогие, средней стоимостью и дорогие электробойлера с характеристиками производителя (табл. 5).

Таблица 5. Типы электронагревательных бойлеров

Тип	Объем, л	Номинальная мощность, кВт	Нагрев воды до, град.	Время нагрева от 10 град, час	Стоимость, грн
ARISTON SG UR 10	80	1,2	75	2,9	686
GORENJE TGR 80 SN	80	2	75	3,4	896
ELECTROLUX - EWH 80 SL	80	1,8	75	3,06	1240

Окупаемость солнечной системы при современных расценках на топливо составляет 4 сезона, после чего система начинает давать бесплатную тепловую энергию [6]. Разработанная модель позволяет динамически отслеживать изменение основных составляющих как электрических, так и солнечных комплексов.

Так, например, наглядно просматривается динамика изменения за счет увеличения тарифов на электрическую энергию. Затраты на солнечную систему носят единовременный характер.

Выводы

Значительная доля органических топлив в коммунальном хозяйстве крымского полуострова идет на получение тепловой энергии. Особенно большое потребление тепловой энергии в курортный сезон. Это происходит в тот момент, когда солнечная инсоляция позволяет использовать гелиоустановки особенно эффективно.

Предложенная в работе модель позволяет курортно-рекреационной системе Крыма и Севастополя перейти на использование возобновляемых источников энергии для обеспечения тепловой энергией потребителей. Такой переход поможет значительно сократить использование органических топлив, уменьшить количество вредных выбросов и улучшить экологическую обстановку в регионе.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» № 27/06–31.

Список литературы

1. Даффи Д. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. /У.Бекман //М.Мир, 1977г.
2. Лосева И.Г. Оценка динамики снижения мощности источников нетрадиционной и возобновляемой электроэнергии (СЭС, ВЭС, далее - ВИЭ). Использование величины снижения мощности в качестве нормативного возмущения. /Перышкин М.Д., Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Небесный В.В.// Энергетические установки и технологии - 2020. Т. 6. № 4. С. 51-56.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153–158.
8. Бордан Д.Ф. Потенциал развития тепловой солнечной энергетики для нужд коммунального хозяйства /Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Олей-

ников А.М., Гхашим М.// Энергетические установки и технологии. 2021 - Т. 7. № 1. С. 46-52.

References

1. Duffy D. Thermal processes with the use of solar energy. Mir, 1977.
2. Loceva I. G. Evaluation of the dynamics of reducing the power of sources of unconventional and renewable electricity (SES, WPP, hereinafter-RES). The use of the value of the reduction in the power of renewable energy sources as a normative perturbation. / Peryshkin M. D., Kakushina E. G., Reshetnikova T. V., Heavenly V. V. // Power installations and technologies-2020. Vol. 6. No. 4. pp. 51-56.
3. 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. pp. 38-41.
4. 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.
5. 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.
6. Vologdin S. V. Analiz razlichnykh scenariy 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.
7. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, no. 3, pp. 153-158.
8. 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

УДК 620.92

Использование тепловой геотермальной энергии для обеспечения коммунальных потребителей в г. Севастополь

В.В. Кувшинов¹, Е.Г. Какушина², Д.И. Тиман³, И.В. Жиганов⁴, А.К. Стаценко⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com ²littie@mail.ru, ³dante477@mail.ru,
⁴ZiganobI@mail.ru,

Институт природно-технических систем, ул. Марата, 6,
г. Севастополь, 299011, Россия, ⁵Stacenko@mail.ru

Статья поступила 19.05.2021 г.; после доработки 20.05.2021 г.

Аннотация

В статье описывается возможность обеспечения коммунальных объектов в г. Севастополь тепловой энергией, полученной от термальных подземных вод. Приведены расчеты мощностных характеристик геотермальных установок и экономического эффекта от их использования

Ключевые слова: термальные подземные воды, возобновляемая энергетика, геотермальной теплоэлектростанции

The use of thermal geothermal energy to provide municipal consumers in Sevastopol

V.V. Kuvshinov¹, E.G. Kakushina², D.I. Timan³, I.V. Zhiganov⁴, A.K. Statsenko⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹kuvshinov.vladimir@gmail.com ²littie@mail.ru, ³dante477@mail.ru, ⁴ZiganobI@mail.ru,
Institute of Natural and Technical Systems, 6 Marata st., Sevastopol, 299011, Russia,
⁵Stacenko@mail.ru

Received 19.05.2021 y.; received in final form 20.05.2021 y.

Abstract

The article describes the possibility of providing municipal facilities in Sevastopol with thermal energy obtained from thermal underground waters. Calculations of the power characteristics of geothermal installations and the economic effect of their use are presented.

Keywords: thermal underground water, renewable energy, geothermal thermal power plant

Введение

Крымские магматические очаги находятся в предгорьях Крыма и залегают на глубинах не более 1,2-1,5 км от уровня моря [1].

Во многих регионах Крыма поисковыми скважинами вскрыты подземные геотермальные воды с повышенным содержанием и температурой от 50°C до 250°C (более 40 скважин). Их использование не получило распространение из-за потенциальной возможности засоления крымских подземных питьевых вод. Нагретые подземные пресные воды по породам с повышенной

пористостью в виде «вееров» расходятся по территории Крымского полуострова (см. рис.1).

Выполненные геофизические исследования на площадях Севастопольского региона (1992-1994 г) с помощью аппаратуры дистанционного комплекса «Поиск» подтвердили значительные скопления геотермальных вод в разломных зонах. Температура подземных вод пригодна для использования в качестве альтернативного источника тепла для хозяйственно-коммунальных нужд. Глубина залегания составляет от 850 м до 1250 м. Избыточный напор воды от 10 до 13 атм.

Причем геотермальные воды в Севастопольском регионе имеют слабую минерализацию и могут быть использованы для бутилирования питьевых вод. После использования в качестве природного теплоносителя пресную геотермальную воду нет необходимости возвращать в подземный поток, исключается засоление почв при утечках таких вод, резко снижается коррозия металлических труб геотермальных скважин.



Рис. 1. Карта-схема границ потоков подземной геотермальной воды в районе г. Севастополя (сплошные черные линии – потоки подземных термальных вод):
1 – район Севастопольской ТЭЦ.

Актуальность темы

Установленные потенциальные ресурсы подземных геотермальных вод Крыма составляют 27 млн. кубических метров в сутки. Температурный режим и химические характеристики геотермальных вод Крыма подтверждают возможности использования их в жилищном и рекреационном секторе.

На действующей геотермальной теплоэлектростанции в селе Медведевка Джанкойского района при содержании газа 1 м³ на 1 м³ термальной воды, при расходе 650 м³ воды в сутки и давлении на устройстве 0,5 МПа было получено 650 кВт тепловой мощности от термальной воды. Также было получено 60 кВт энергетической мощности от электрогенератора, за счет сжигания газовой составляющей в приводном двигателе внутреннего сгорания, переоборудованном под газ. Тепловая энергия используется для отопления школы и детского сада [5]. Для обеспечения круглогодичного использования геотермальной энергии создан проект технологического комплекса, в котором геотермальная

энергия используется для теплоснабжения жилых домов поселка Янтарное. По данным «Крымгеологии» запасы термальных вод на территории Красногвардейского района составляет 39000 м³/сут., которые с избытком покрывают максимальные тепловые нагрузки в поселке Красногвардейское.

Опыт использования геотермальных источников показал большие возможности во внедрении систем электротеплоснабжения с использованием источников геотермальной энергии. Температурный режим и химические характеристики геотермальных вод Крыма позволяют их практическое использование в системах электротеплоснабжения курортно-рекреационных комплексов, жилищно-коммунального сектора и сельского хозяйства.

Цели и задачи исследования

Задачей исследования была оценка возможности использования альтернативного природного источника тепла (геотермальных вод) для сокращения объемов использования природного газа котельными рекреационного комплекса в г. Севастополь.

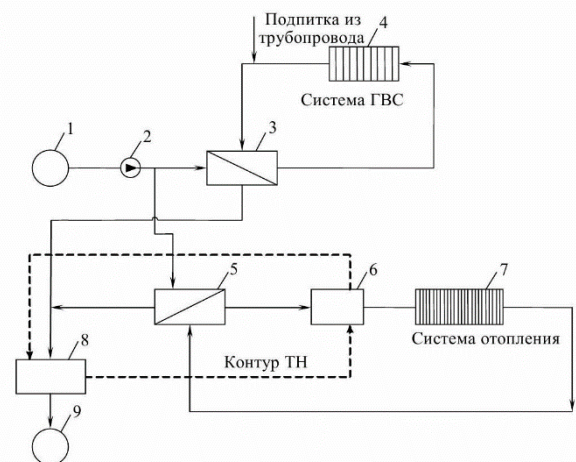


Рис. 1. Система теплоснабжения с использованием геотермальных вод:

1 – геотермальный источник; 2 – насос подачи геотермальной воды; 3 – бойлер ГВС; 4 – система горячего водоснабжения (ГВС); 5 – бойлер отопления; 6 – конденсатор теплового насоса (ТН); 7 – система отопления; 8 – испаритель теплового насоса; 9 – скважина утилизатор.

В источниках описаны различные схемы теплообеспечения жилых домов в районе г. Севастополя на базе существующих котельных, с использованием теплонаносных станций [2-3].

Одна из схем системы теплоснабжения с использованием геотермальных вод, показана на рис. 2. Использование тепловых насосов (ТН) значительно повышает энергетической эффект всей системы.

Подобные разработки дают возможность рассчитывать на значительный экономический эффект от внедрения энергосберегающих технологий, основанных на использовании термальных вод.

Согласно данным геологоразведочных работ приводятся характеристики подземных водных потоков, проходящих под морским дном и береговой зоной Севастопольской бухты (см. рис.1):

- Глубина залегания – 1100-1200 м;
- Температура воды – 78-85 °С;
- Состав воды – слабоминерализованная, пригодная для питья;
- Залегание воды – в породах с крупнозернистым песчаником повышенной трещиноватости.
- Направление миграции подземных вод – с востока на запад и с юга на север со сбросом в море на глубинах более 600 м.

Потоки подземных вод проходят под территориями практически всех районов города Севастополя. Используя эти данные можно рассчитать энергетическую возможность геотермальной скважины и экономию традиционных топливных ресурсов при переходе на возобновляемую энергетику [4, 6]. Также появляется возможность оценить экологический и экономический эффекты от реализации такого проекта.

Полученные результаты

Потоки подземных вод проходят под территориями практически всех районов города Севастополя. Используя эти данные можно рассчитать энергетическую возможность геотермальной скважины и экономию традиционных топливных ресурсов при переходе на возобновляемую энергетику. Также появляется возможность оценить экологический и экономический эффекты от реализации такого проекта.

В качестве исходных данных для реализации проекта были выбраны расчетные характеристики Севастопольской ТЭЦ. Согласно карте, изображенной на рис.1, потоки геотермальных вод проходят непосредственно под ней. Мощности котлов этой станции, работающих на природном газе, позволяют, при замене их на геотермальные установки значительно сэкономить

топливные энергетические ресурсы.

Исходные данные:

Севастопольская ТЭЦ:

- общая мощность $P_{2\text{ общ.}}=54,5$ МВт;
- электрическая мощность $P_{2\text{ эл.}}=20$ МВт;
- тепловая мощность $P_{2\text{ т.}}=34,5$ МВт (29 Гкал/ч);
- электрический КПД станции (количество теплоты превращенное в электричество), для расчета возможной выработки электрической энергии с геотермальной воды $\eta_{\text{ТЕС}}=0,25$.

Характеристики топлива и теплоносителя:

- Теплота сгорания природного газа около 25 МДж/м³;
- Состав природного газа CH₄ (метан) до 89% по объему;
- Глубина скважины до 1200 м;
- Температура геотермальной воды $t_1=78$ °С;
- Температура внешней среды $t_2=20$ °С;
- Теплоемкость воды $C_p=4190$ Дж/кг·°С;
- КПД глубинного насоса $\eta_{\text{нас.}}=0,8$;
- Расход воды в скважине $G=500$ м³/ч=138 кг/с.

Расчет тепловой мощности скважины:

$$P_{\text{общ.скваж.}} = G \cdot C_p \cdot (t_1 - t_2) \quad (1)$$

$$P_{\text{общ.скваж.}} = 138 \text{ кг/с} \cdot 4190 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{°С)} \cdot (78^\circ\text{С} - 20^\circ\text{С}) = 33\,536\,760 \text{ Вт};$$

$$Q_{\text{час}} = P_{\text{общ.скваж.}} \cdot 3600 \text{ с};$$

$$Q_{\text{час}} = 33\,536\,760 \text{ Вт} \cdot 3600 \text{ с} = 120\,732\,336\,000 \text{ Дж/ч} = 28,8144 \text{ Гкал/ч};$$

$$Q_{\text{год}} = Q_{\text{час}} \cdot 8760 \text{ ч};$$

$$Q_{\text{год}} = 28,8144 \text{ Гкал/ч} \cdot 8760 \text{ ч} = 252\,414,144 \text{ Гкал/год}.$$

Определение выработанной (эквивалентной) электрической мощности:

Согласно тепловому балансу, при выработке электрической энергии на ТЭС, в среднем 25 % от данной тепловой энергии можно превратить на электрическую, поэтому:

$$P_{\text{эл.скваж.}} = P_{\text{общ.скваж.}} \cdot \eta_{\text{ТЕС}} \quad (2)$$

$$P_{\text{эл.скваж.}} = 33\,536\,760 \text{ Вт} \cdot 0,25 = 8\,384\,190 \text{ Вт};$$

$$P_{\text{эл.скваж.год}} = P_{\text{эл.скваж.}} \cdot 8760 \text{ ч};$$

$$P_{\text{эл.скваж.год}} = 8\,384\,190 \text{ Вт} \cdot 8760 \text{ ч} = 73\,445\,504,4$$

кВт·ч/год.

Описание расчетной мощности насоса, необходимой для подъема воды с геотермального источника:

$$P_{\text{нас.}} = g \cdot Q \cdot H / \eta_{\text{нас.}}, \text{ (кВт)} \quad (3)$$

$$P_{\text{нас.}} = 9,81 \text{ м/с}^2 \cdot 0,138 \text{ м}^3/\text{с} \cdot 1200 \text{ м} / 0,8 = 2030,67 \text{ (кВт)}.$$

Объем сэкономленного природного газа, при замене его на энергию от данного геотермального источника.

При сжигании 1 м³ природного газа выделяется в среднем 25 МДж/м³ или 0,006 Гкал/м³ теплоты, при расчетах геотермальной установки она способна давать в год количество теплоты эквивалентное 252414,144 Гкал/год, поэтому объем сэкономленного природного газа в год соответствует:

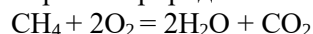
$$V_{\text{эконом}} = 252\,414,144 / 0,006 = 42069\,024 \text{ м}^3/\text{год};$$

Так как объемная частица метана в природном газе до 89 %, то реальная экономия составляет:

$$42\,069\,024 \text{ м}^3 / 0,89 = 47268\,566 \text{ м}^3$$

Количество CO₂ (углекислого газа) не попавшего в атмосферу при использовании данной технологии:

Горение природного газа:



количество CO₂ не попавшего в атмосферу составляет около 47268 566 м³,

Финансовая экономия на природном газе:

В данный момент цена на природный газ в среднем по России для нужд промышленности равна 5,5 руб./м³, таким образом экономия финансовых средств в год будет:

$$47\,268\,566 \text{ м}^3 \cdot 5,5 \text{ руб.} = 259\,977\,113 \text{ руб.}$$

Цена бурения скважины:

Одна из главных затратных статей стоимости строительства объекта будет составлять стоимость буровых работ. Согласно данным (геология) цена бурения скважины за 1 м составляет 1500 руб. при глубине скважины до 300 – 500 м. В итоге цена нашей скважины составляет:

$$1500 \text{ руб.} \cdot 1200 \text{ м} = 1\,800\,000 \text{ тыс.руб.}$$

Выводы

Предварительные исследования скоплений геотермальных вод в Севастопольском регионе

показывают, что их геофизические параметры залегания позволяют практическое их использование для обеспечения автономного энергосберегающего рекреационного комплекса.

Для разработки проекта использования геотермальных вод в курортно-рекреационной сфере г. Севастополя необходимо выполнить соответствующие расчеты энергетических характеристик геотермальной скважины, насосных установок и стоимости буровых работ.

Расчеты, выполненные по объемам сэкономленного природного газа, показывают, что использование геотермальной энергии существенно сократит финансовые затраты на горячее водоснабжения рекреационного комплекса [7].

Работы по исследованию возможностей теплового обеспечения объектов и использованием НВИЭ, наличие предприятий, выполняющих буровые работы, проектных и научных кадров, работающих в Крымском регионе, позволяют разрабатывать и внедрять проекты использования геотермальных вод для курортно-рекреационных комплексов расположенных в Республике Крым [8, 9].

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» № 27/06–31.

Список литературы

1. Экология Крыма. Справочное пособие / Под ред. Н.В. Багрова и В.А. Бокова. – Симферополь: Крымское учебно-педагогическое государственное издательство, 2003. – 360 с.
2. Янторовский Е.И. Теплонасосные станции в энергетике / Е.И. Янторовский, Ю.В. Пустовалов, В.С. Янков // Теплоэнергетика. – 1978. – № 4. – С. 13-19.
3. Софийский Ю.И. К вопросу о создании теплонасосной станции на базе южных очистных сооружений и котельной Камышовой бухты г. Севастополя / Ю.И. Софийский, В.А. Пухлий, С.Т. Мирошниченко // Сборник научных работ СНУЯЭиП. – Севастополь. – 2009. – Вып. 2 (30). – С. 129-135.
4. Авакян М.К. Методы решения глобальной условной оптимизации применительно к энергетическим системам / Авакян М.К., Перышкин М.Д., Какушина Е.Г., Решетникова Т.В., Соломонович А.В. // Энергетические установки и технологии - 2020. Т. 6. № 4. С. 38-41.
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. 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.
 7. 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.
 8. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. / Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153–158.
 9. 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.

References

1. Ecology of the Crimea. Reference manual / Edited by N. V. Bagrov and V. A. Bokov. - Simferopol: Crimean educational and Pedagogical State Publishing House, 2003. - 360 p.
2. Yantorovsky E. I. Heat pump stations in power engineering / E. I. Yantorovsky, Yu. V. Pustovalov, V. S. Yankov // Heat and power engineering. 1978. No. 4. pp. 13-19.
3. Sofiyskiy Yu. I., Pukhliy V. A., Miroshnichenko S. T. On the issue of creating a heat pump station on the basis of southern treatment facilities and the boiler house of the Kama Bay of Sevastopol. - Sevastopol. 2009. T 2 (30), pp. 129-135.
4. 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. pp. 38-41.
5. Guryev, V. V., Development of renewable IP-source of electricity in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kakushina E. G., B. A. Yakimovich, Kuvshinov V. V. // Energy and technology 2019. Vol. 5 No. 2. pp. 90-93.
6. 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.
7. Vologdin S. V. Analiz razlichnykh scenariy 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.
8. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, no. 3, pp. 153–

158.

9. Bordan D. F. Potentiality of the development of thermal solar energy for the needs of the municipal economy / Kuvshinov V. V., Kakushina E. G., Oleynikov A.M., Ghashim M. // Energy and technology. 2021. Vol. 7. no. 1. pp. 46-52.

УДК 620.92

Использование ветровых и солнечных установок для обеспечения автономного жилого дома

В.В. Кувшинов¹, Е.Г. Какушина², Р.А. Нашев³, Д.Ф. Бордан⁴, Д.И. Тиман⁵

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com ²littie@mail.ru, ³Nashev@mail.ru,
⁴bordan79@mail.ru, ⁵dante477@mail.ru,

Статья поступила 19.05.2021 г.; после доработки 20.05.2021 г.

Аннотация

В статье приведены расчеты энергетических параметров автономных систем, используемых для обеспечения индивидуального потребителя. Ветровые и солнечные установки обеспечены системами автоматического регулирования и снабжают тепловой и электрической энергией энергоэффективный жилой дом, расположенный в городе Севастополь.

Ключевые слова: автономные системы, тепловая и электрическая энергия, ветровая и солнечная энергия

The use of wind and solar installations to provide an autonomous residential building

V.V. Kuvshinov¹, E.G. Kakushina², R. A. Nashev³, D. F. Bordan⁴, D. I. Timan⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹kuvshinov.vladimir@gmail.com ²littie@mail.ru, ³Nashev@mail.ru, ⁴bordan79@mail.ru, ⁵dante477@mail.ru,

Received 19.05.2021 y.; received in final form 20.05.2021 y.

Abstract

Calculations of the energy parameters of autonomous systems used to provide individual consumers are given. Wind and solar installations are provided with automatic control systems and supply heat and electricity to an energy-efficient residential building located in the city of Sevastopol.

Keywords: autonomous systems, heat and electricity, wind and solar energy

Введение

При эксплуатации жилых комплексов в различных районах Республики Крым и городе Севастополь в настоящее время расходуется значительное количество тепловой и электрической энергии. Значительное количество этой энергии вырабатывается при сжигании традиционных органических топлив (нефтепродукты, природный газ, уголь), загрязняя курортный регион вредными выбросами. Используя ветровую и солнечную энергию для обеспечения жилых комплексов возможно значительно снизить экологическую нагрузку на Крымский регион и

уменьшить потребление ископаемых топлив. В качестве примера такого использования было выбрано индивидуальное жилое строение, типичное для представленного региона. Т.е. для автономного энергообеспечения был выбран частный жилой дом на 3-5 человек, находящийся в стадии строительства, общей площадью 120 м². Дом располагается в Севастополе, в районе бухты Казачьей, на участке размером в 6 соток. Вокруг есть открытое пространство для будущего места установки ветрогенератора. Дом находится на 15 м над уровнем Черного моря. По предварительным расчётам жильцы дома будут

потреблять не больше 200-250 кВт электроэнергии ежемесячно. По санитарным нормам количество воды на одного человека в сутки составляет 100 литров. Затраты электроэнергии не очень высокие, т.к. хозяева будут использовать для нагрева воды солнечный коллектор, а ветрогенератор и фотоэлектрический преобразователь необходим только для обеспечения бытовых приборов электроэнергией.

Для расчета необходимо составить баланс между электроэнергией, выработанной энергокомплексом, и объемом потребляемой электроэнергии. Если подсчитать объем произведенной за год электроэнергии довольно просто, то с объемом потребляемой электроэнергии дело обстоит иначе. Проще всего было бы взять и просуммировать все мощности, имеющихся в обиходе электроприборов. Тогда необходимая мощность вообще и мощность энергокомплекса получится завышенной, что приведет к удорожанию проекта. Другими словами, такой способ определения мощности Энергокомплекса является приблизительным. Для получения более объективных данных, необходимо провести энергоаудит. Необходимо спрогнозировать сколько часов в день или в месяц, год будет работать каждый электроприбор. Помножив количество часов его работы на мощность, можно определить, сколько кВт·ч потребляет каждый прибор в день (месяц, год). Просуммировав все полученные значения за день (месяц, год), получаем суточное (месячное, годовое) потребление электроэнергии за интересующий период. Для горячего водообеспечения считаем объем воды, исходя из санитарных норм, хотя для более точных расчетов необходимо проводить суточный аудит потребления [2].

Для расчета приблизительной нагрузки на электрооборудование дома определим основные электробытовые приборы. В доме имеются такие потребители энергии как холодильник - 1 шт. (250-350 Вт), телевизор - 3 шт. (150-250 Вт), компьютер - 1 шт. (350-450 Вт), стиральная машина - 1 шт. (1000-1700 Вт), бойлер - 1 шт. (1000-2500 Вт), энергосберегающая лампа - 10 шт. (25 Вт). Необходимые затраты по горячей воде: 5 человек по 100 литров.

Суммируем значения максимально потребляемой электрической энергии. Это дает пиковую нагрузку в 5500 Вт. Хозяева проводят основную часть дня на работе, а пик потребления электроэнергии приходится на утренние и вечерние часы. В этот момент могут быть включены электроприборы суммарной мощностью до ≈ 5 кВт.

Объем горячей воды составляет 500 литров/сутки. Для дублирования к дому подведено электричество с номинальными параметрами сети 220 В и 50 Гц [1].

Постановка задачи

В Севастополе летом преобладают западные и северо-западные ветра, зимой - северо-восточные, с наибольшей скоростью в ноябре. Приблизительно 40 дней в году преобладают сильные ветра и бури, скорость ветры может быть более 15 м/с. Кроме ветров общей циркуляции наблюдаются местные ветра – дневные и ночные.

Севастополь расположен на широте 45° , является одним из наиболее солнечных городов Украины - суммарная радиация равна 5261 МДж/год м^2

Для расчетов будем пользоваться данными метеостанции «Херсонесский маяк», расположенной в г. Севастополе, по вероятности скорости ветра по градациям и данными среднемесячной суммарной прямой, рассеянной и общей солнечной радиации на горизонтальную поверхность ($\text{Вт} \cdot \text{ч/м}^2$) за месяц.

Основные величины, которые определяют работу всего комплекса.

Первая - это выходная мощность ветроустановки и фотоэлектрической батареи, которая определяется только мощностью преобразователя (инвертора), и не зависит от скорости ветра, значения солнечной радиации, емкости аккумуляторов. Ещё её называют «пиковой нагрузкой». Этот параметр определяет максимальное количество электроприборов, которые могут быть одновременно подключены к вашей системе, а для солнечного коллектора - это максимальный забор воды с необходимой температурой. Вы не сможете одновременно потреблять больше электроэнергии, чем позволяет мощность вашего инвертора, или больше расходовать воды, чем нагрел солнечный коллектор. Если вы потребляете электроэнергию или пользуетесь горячей водой редко, но в больших количествах, то необходимо увеличить мощность солнечной батареи и солнечного коллектора, либо использовать дополнительные аккумуляторы [3].

Вторая - это время непрерывной работы при отсутствии ветра, при слабом ветре или бессолнечном дне. Оно определяется емкостью аккумуляторных батарей ($A \cdot \text{ч}$ или кВт) и зависит от мощности и длительности потребления. Для обеспечения более длительного и стабильного энергообеспечения необходимо дополнительно

устанавливать еще дополнительный аккумуляторный резервный запас.

Третья - это скорость заряда аккумуляторных батарей (кВт/час), которая зависит от мощности самого энергокомплекса. Также этот показатель прямо зависит от скорости ветра, количества солнечных дней, а косвенно от высоты мачты, рельефа местности и угла наклона модуля к горизонту. Чем мощнее энергокомплекс, тем быстрее будут заряжаться аккумуляторные батареи, а это значит, что вы сможете быстрее потреблять электроэнергию из батарей и в больших объемах. Более мощный энергокомплекс следует выбрать в том случае, если ветер в месте установки слабый, мало количество солнечных дней в году, или вы потребляете электроэнергию постоянно, но в небольших количествах [4]. Для увеличения скорости заряда аккумуляторов возможна установка нескольких генераторов, модулей фотоэлектрических батарей одновременно и подключение их к одной аккумуляторной батарее. Это касается и нагрева воды до необходимой температуры.

Исходя из перечисленных выше факторов, для подбора энергокомплекса и сопровождающего оборудования нам необходимо ответить на следующие вопросы:

- Количество электроэнергии и горячей воды, необходимое объекту ежемесячно. Эти данные необходимы для подбора генератора. Их можно взять из коммунальных счетов на оплату электроэнергии или рассчитать самостоятельно, если объект находится в стадии строительства.

- Желаемое время автономной работы вашей энергосистемы в безветренные периоды или периоды, когда ваше потребление энергии из аккумуляторов будет превышать скорость зарядки аккумуляторных батарей генератором. Данный параметр определяет количество и емкость аккумуляторов.

- Максимальная нагрузка на вашу сеть в пиковые моменты (измеряется в киловаттах). Необходимо для подбора инвертора переменного тока.

Таким образом суммарно нам необходимо обеспечить 200-250 кВт электроэнергии ежемесячно с пиковыми нагрузками 5 кВт и 100 литров на 1 человека горячей воды в сутки. Произведем следующий расчет. Чтобы понять, как быстро должны заряжаться аккумуляторы при расходе электроэнергии 250 кВт в месяц, мы должны разделить 250 кВт/месяц на 30 дней ($250/30 = 8,34$ кВт - среднее ежедневное потребление), а затем полученное число разделить на 24 часа ($8,34/24$

$= 0,347$ кВт/час – среднее ежечасное потребление). Скорость заряда аккумуляторных батарей генератором должна составить как минимум 347 Ватт в час. В Севастополе низкая среднегодовая скорость ветра, но открытое пространство и возвышение объекта позволит ветрогенератору работать как минимум на 30-40% от номинальной мощности [5]. Для того, чтобы обеспечить заряд аккумуляторных батарей генератором при этих условиях со скоростью 0,347 кВт/час, нужно взять генератор и фотоэлектрический преобразователь, номинальная мощность которого будет как минимум в три раза больше необходимой, т.к. генератор будет работать всего на 30-35% от номинальной мощности ($347 \text{ Вт/ч} * 3 = 1041 \text{ Вт/ч}$). Для этих нужд нам подходит генератор с номинальной мощностью 1 кВт и 3 модуля KV-150/24 с номинальной мощностью 450 Вт. Для расчета объема воды мы количество людей умножаем на ежедневное потребление, получаем ($5 * 100 = 500$ л/сут.).

Результаты исследования

В типовой состав системы энергообеспечения нагрузок на 220В/50Гц входят следующие компоненты:

- ветрогенератор вырабатывает "грубую" электроэнергию с нестабильными параметрами, зависящими от скорости ветра;
- фотоэлектрическая батарея - опциональный компонент, вырабатывающий постоянную энергию. Повышает надежность энергообеспечения и суммарную выработку энергии;
- плоский солнечный коллектор, обеспечивающий горячее водоснабжение;
- аккумуляторная батарея (АБ) - накопитель энергии для согласования графиков выработки и потребления энергии;
- гибридный контроллер – согласовывает работу энергокомплекса;
- источник бесперебойного питания ИБП-1.5/3С-ВГ/ФМ - устройство, согласующее между собой указанные выше компоненты, нагрузку и внешнюю сеть 220В. Заряжает АБ от ВЭУ, ФЭП и внешней сети 220В. Преобразует накопленную в АБ энергию в стабилизированные 220В/50Гц с номинальной мощностью до 1,5 кВт. Автоматически коммутирует нагрузку на питание от внешней сети 220В или от преобразователя. Отображает параметры системы на цифровом индикаторе;

- инвертор преобразовывает постоянный ток от аккумуляторов в переменный для потребителя.
- тепловой Аккумулятор - накапливают энергию и отдают потребителю;
- энергосеть резервный источник питания;
- потребители.

Выбор ветроэлектрической установки (ВЭУ)

Для обеспечения энергокомплекса выбираем ветроустановку EuroWind 1 (рис. 1).



Рис. 1. ВЭУ EuroWind 1

Максимальная мощность ветроустановки может достигать 1600 Вт, при скорости ветра 11-12 м/с. Мощностная характеристика ВЭУ приведена на рис.2.

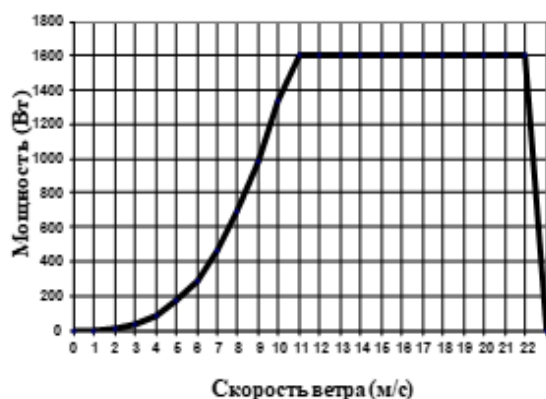


Рис. 2. Зависимость мощности ВЭУ от скорости

В целях безопасности при увеличении силы ветра генератор поворачивается под углом относительно направления ветра, снижая нагрузку на лопасти и замедляя скорость вращения. В малых ветрогенераторах эта функция реализована с помощью особенностей строения конструкции, а в мощных - с помощью специального поворотного механизма, контролируемого электроникой [6].

Основные энергетические характеристики для ВЭУ, при использовании на мысе Херсонес, определяем по данным ближайшей метеостанции для вероятностей скоростей ветра.

Таблица 1. Основные характеристики ВЭУ

Параметры	Величина	Параметры	Величина	Параметры	Величина
Диаметр ротора	2,7 м	Напряжение после инвертора	220В	Исходное напряжение генератора	48В
Количество лопастей	3 шт.	Выдерживает ветер	до 45 м/с	Рекомендованные аккумуляторы	4 шт. 12В 200Ач
Максимальная мощность	1600 Вт	Рабочая температура:	от -40 до +60 С	Высота сборной мачты-фермы	17 м
Направление	всегда по ветру (флюгер)	Защита от ветра	механическое флюгирование	Время для полной зарядки аккумуляторов	около 8 ч
Материал лопастей	FRP (композитный материал)	Скорость вращения ротора	400 оборотов/мин	Высота мачты с растяжками	6 или 9 м
Начальная скорость	2 м/с	Тип ветротурбины	PMG (на постоянных магнитах)	Высота мачты конической и гидравлической	по 8 м
Вес	179 кг	Контроллер заряда: Hybrid (солнце + ветер + инвертор)			

Все генераторы практически бесшумные. При низких и средних ветрах они не издадут звуков.

При сильных ветрах появляется лёгкий шелест, который создаётся при срыве ветра с лопастей генератора [7]. Уровень шума ветрогенератора в данной таблице включает в себя также сам уровень шума ветра и посторонние фоновые шумы, которые возникали при замерах – шелест деревьев, гул проводов и т.п.

Таблица 2. Характеристики генератора

Модель	1	Номинальное переменное напряжение (В)	68	Номинальная переменная сила тока (А)	15
Номинальная мощность	1000	Номинальное постоянное напряжение (В)	48	Номинальная скорость вращения (об/мин)	400
Вес генератора (кг)	48	Номинальная постоянная сила тока (А)	21	Максимальная скорость вращения (об/мин)	500

Таблица 3. Характеристики лопастей

Модель	1
Материал	Стекловолокно
Кол-во лопастей	3
Диаметр ветроколеса (м)	2,7
Площадь ветроколеса (м ²)	5,7

Для дополнительного электрообеспечения жилого дома устанавливаем фотоэлектрическую батарею, состоящую из трёх фотоэлектрических модулей, производства фирмы «Квазар» общей мощностью 450 Вт. В таблице 5 приведены характеристики отдельного модуля.

Таблица 4. Энергетические характеристики ВЭУ

Месяцы	Средняя энергосработка (кВт ч)	Энергосработка по месяцам (кВт ч)
январь	0,55	413
февраль	0,833	580
март	0,708	527
апрель	0,468	337
май	0,333	248
июнь	0,314	226
июль	0,266	198
август	0,345	257
сентябрь	0,446	321
октябрь	0,552	411
ноябрь	0,576	415
декабрь	0,684	509

За год	0,506	4442
--------	-------	------

Используя данные метеослужбы для среднемесячной суммарной солнечной радиации в окрестностях г. Севастополя, можно теоретически рассчитать энерговыработку фотоэлектрического модуля (см.табл. 6).

При работе в натурных условиях следует учитывать ориентацию фотоэлектрического модуля, как по азимуту, так и по углу установки от горизонтальной поверхности

Фотоэлектрические батареи для энергокомплекса

Таблица 5. Характеристики фотоэлектрического модуля

Тип	KV-150/24M	Максимальная энергетическая мощность P _{max}	150 Вт	Напряжение холостого хода U _{xx}	43,5 В
Солнечный тип ячейки	монокристаллический кремний	Напряжение в максимальном энергетическом U _{max}	33,7 В	Ток в максимальном энергетическом I _{max}	4,45
Размеры (мм)	1585x805x34,5	Выходное напряжение	12 В	Ток короткое замыкание I _{кз}	4,90 А
Кабельная длина	100 см каждый	Соединитель	Tuc o sola rlok	Производитель фирма «Квазар»	

Таблица 6. Теоретические энергетические характеристики Вт ч с 1 м² фотоэлектрической батареи при установке на горизонтальную поверхность

Месяцы	Энергосработка (Вт ч/м ²)
январь	4572,5
февраль	5219,2
март	8760,6
апрель	13719,0
май	16966,3
июнь	19299,0
июль	21039,7
август	17970,7
сентябрь	13587,0
октябрь	9811,5
ноябрь	4939,0
декабрь	3134,1
За год	125299,6

Выбираем коллектор, рассчитанный на максимальное давление 1,0 Мпа и рабочее давление в системе- 0,6 Мпа типа TS-30-58PA.

Вакуумные трубы преобразуют солнечную энергию в тепловую, которая передается медным U-образным трубкам с высокой степенью поглощения и незначительными потерями посредством алюминиевого оребрения. Теплоноситель – антифриз, который переносит энергию от U-образной трубки воде посредством медного теплообеника (рис. 3).

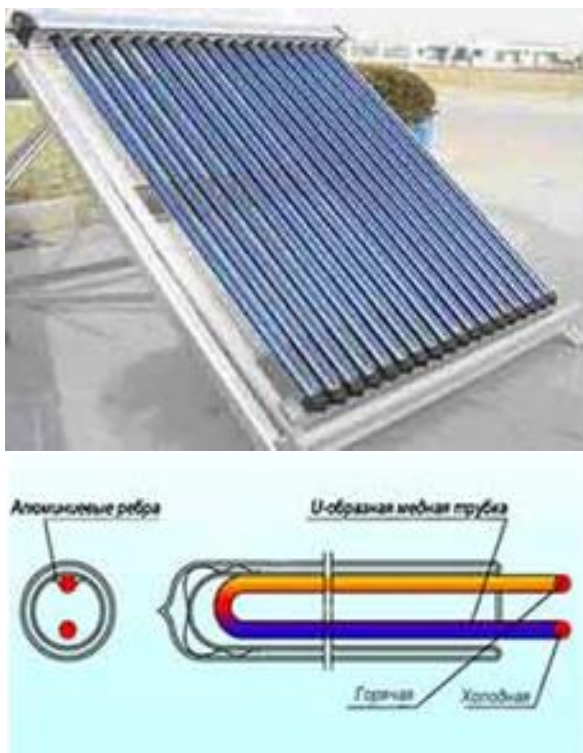


Рис. 3. Вакуумный солнечный коллектор

Характеристики и ориентировочная выработка приведена в таблице 7.

Таблица 7. Технические характеристики высокоэффективных вакуумных солнечных коллекторов

Модель	TS-30-58PA
Внешний диаметр трубы, мм	58
Максимальная производительность при температуре нагрева от 15 до 50°C, л/сутки	380
Длина труб, мм	1800
Внутренний диаметр трубы, мм	47
Количество трубок	30
Площадь поглотителя**, м ²	2,54
Максимальная мощность коллектора при интенсивности солнечного излучения 1000 Вт/м ² , скорости ветра 0 м/с, температуре окружающей среды 20°C, кВт.	2,5

Подобная система более устойчивой к морозам, а наличие автоматики позволяет обеспечить оптимальный теплоотбор. Отбор нагретой воды из бака-аккумулятора (БА) производится с верхней точки бака методом вытеснения, то есть путем подачи холодной воды из водопровода (или иного источника) под давлением в нижнюю часть бака. Принципиальная схема такой системы не зависит от ее производительности и места установки.

Таблица 8. Производительность вакуумного солнечного коллектора

Производительность высокоэффективного вакуумного солнечного коллектора при нагреве воды от 15 до 50°С, угол установки солнечных коллекторов 45°	TS-30- 58P		
	Месяц	За сутки, кВт ч	За сутки, л/сутки
	январь	4,79	117,5
	февраль	5,71	140,2
	март	8,43	207
	апрель	10,86	266,7
	май	11,83	290,4
	июнь	13,31	326,7
	июль	14,49	355,6
	август	13,49	331,1
	сентябрь	12,05	295,8
	октябрь	10,01	245,7
	ноябрь	6,05	148,6
	декабрь	4,17	102,3
	За год	3511	86198

Выбор вспомогательного оборудования

Контроллер – управляет многими процессами ветроустановки: такими, как поворот лопастей, включение насоса, заряд аккумуляторов, защитные функции от перегрузки и др. Он преобразовывает переменный ток, который вырабатывается генератором в постоянный для заряда аккумуляторных батарей. Более дорогие модели включают в себя контроллеры и инверторы. Для комплекса «Солнце + Ветер» целесообразно использовать гибридный контроллер, который используется как для ветрогенератора, так и для солнечных панелей (фото модулей) одновременно. Это одно устройство включает в себя сразу три: контроллер ветрогенератора, контроллер солнечных панелей и инвертор. Стоимость такого устройства равна сумме стоимости стандартного контроллера и стандартного инвертора.

Аккумуляторные батареи (АБ) – накапливают электроэнергию для использования в безветренные часы. Также они выравнивают и стабилизируют выходящее напряжение из генератора и ФЭП. Благодаря ему мы получаете стабильное напряжение без перебоев даже при порывистом ветре или облачном дне. Питание объекта идёт от аккумуляторных батарей. Применя-

ется стационарные свинцово-кислотные герметизованные АБ, не требующие обслуживания, с номинальным напряжением 48В и рекомендуемой емкостью 150А·ч [8].

Основное потребление происходит утром и вечером. Между этими основными пиками существует интервал в 8-9 часов. При среднем уровне заряда аккумуляторных батарей 347 Вт/ч за интервал 8-9 часов генератор сможет выработать (3479 - 3123 Вт·ч). В ветреные дни этот показатель может увеличиться, как минимум, в два раза, поэтому за тот же период времени может быть выработано 6246 Ватт электроэнергии. ФЭП работает 8-10 часов в светлое время суток и вырабатывает около 1-2 кВт. Во время отсутствия ветра и солнца, заряд аккумуляторов осуществляется при необходимости и общественной электрической сетью.

Подбор аккумуляторов.

Суммарное напряжение всех последовательно-подключенных аккумуляторных батарей должно равняться исходящему напряжению ветрогенератора и входящему напряжению инвертора. Генератор и ФЭП имеет напряжение по 48 В, поэтому им необходимо 4 аккумулятора с напряжением 12 Вольт ($12В \cdot 4$), т.е. 48В.

Для точного расчёта ёмкости (А·ч) необходимо учитывать особенности использования электроэнергии, температурный режим и особенности самих батарей. Емкость аккумуляторов влияет на длительность автономной работы от них при низкой скорости ветра или полном его отсутствии. Чем больше емкость ваших аккумуляторных батарей, тем больше может генератор накопить в них электроэнергии, и тем дольше вы сможете обеспечить себя этой электроэнергией. Одна аккумуляторная батарея 12В 200Ач способна сохранить до 2 кВт электроэнергии, а все АБ $200 \cdot 4$ приблизительно ~ 8 кВт. Накопителя 12В 100Ач хватает приблизительно на 1 час работы при нагрузке 1 кВт, т.е. 1 кВт/час. Меньшие емкости могут обеспечить соответственно: 12В 40Ач – 24 минуты при нагрузке 1 кВт. В нашем случае полной зарядки АБ при максимальной нагрузке в 5кВт хватит ($8000Вт/5000Вт = 1.6$ часов) более полутра часов непрерывной работы.

Если увеличить нагрузку, то автономный срок работы уменьшается прямо пропорционально увеличенной нагрузке.

Увеличение суммарной емкости батарей достигается последовательным подключением дополнительного комплекта аккумуляторов. При этом надо учитывать, что аккумуляторы должны быть одной и той же марки, модели, а также с

одинаковым сроком использования. Ниже приводится пример специализированных батарей SP 12-200I для систем автономного электропитания.

Автоматический переключатель источника питания (АВР).

Этот элемент общей схемы производит автоматическое переключение между базовым и резервным источниками электропитания (табл. 7.20) за промежуток в 0,5 секунды при исчезновении основного источника. Он позволяет объединить автономный энергокомплекс и общественную электросеть, дизель-генератор и другие источники питания, создавая при этом надежную автоматизированную систему электроснабжения. Выбор АВР производится из расчета номинального тока нагрузки. Для нашей системы:

Таблица 9. Характеристики модели контроллера WWSI1010-48

Совместимые генераторы	EuroWind 1
Входящее напряжение (В)	48
Номинальная мощность ветрогенератора (Вт)	1000
Максимальная мощность одной солнечной панели (Вт)	300
Максимальная общая мощность, которую может принять инвертор (панели+генератор) (Вт)	2000
Номинальная исходящая мощность инвертора (Вт)	1000
Исходящее напряжение (В)	220
Частота (Гц)	59
Тип синусоиды	Чистая синусоида
Отображаемые параметры на дисплее	Напряжение аккумуляторов, сила тока зарядки, состояние устройства
Размеры (д*ш*в) (мм)	410*350*160
Вес (кг)	16

При пропадании внешней силовой сети или отклонении параметров сети от заданных: (понижение напряжения ниже заданного порога, падение или повышение частоты заданного порога, пропадание фазы) с задержкой 1 или 3 секунды (время задержки можно установить), автоматический переключатель ASCO серии 300 проверяет наличие резервной сети и при соответствии параметров резервного источника (напряжение, частота, чередование фаз) подключает нагрузку к аварийной (резервной) сети.

Если в качестве резервного источника используется электрогенератор, при пропадании внешней силовой сети через 1 или 3 секунд

(время задержки можно установить), автоматический переключатель ASCO серии 300 выдает сигнал на автоматический старт дизель - генератора. После запуска двигателя, микропроцессорный блок переключателя контролирует напряжение и частоту генератора и при соответствии параметров генерируемого напряжения, дистанционный переключатель подключает нагрузку к генератору.

$$I_p = 5000V_T / 220V_T = 22.7A \quad (1)$$

Как пример можно использовать АВР типа ASCO серии А 300 (см. табл. 11). В основу его силового переключателя положен принцип одностороннего механизма

Таблица 10. Аккумуляторная батарея SunLight SP 12-200

Тип	SP 12-200I
Напряжение (В)	12
Номинальная емкость	(А*ч) 200
Длина(мм)	518
Ширина (мм)	240
Высота (мм)	242
Высота выводов. (мм)	223
Вес (кг)	65
Срок службы	до 10-12 лет
Стоимость	15600 руб.

При восстановлении параметров основного источника напряжения автоматический переключатель ASCO серии 300 (табл. 12) переключает потребителя на основной источник (энергосистема) с задержкой от 0 мин до 30 мин (задержка используется в случае неустойчивой работы сети) и выдает команду на остановку дизель - генератора с задержкой по времени (охлаждение двигателя). Все состояния работы переключателя отображаются на панели индикации и управления.

Работой автоматического переключателя серии 300 (АВР) управляет микропроцессорная панель.

Инвертор.

Он преобразовывает ток из постоянного, который накапливается в аккумуляторных батареях, в переменный, необходимый большинству электроприборов.

Таблица 11. Технические характеристики ASCO серии А 300

Номинальный ток нагрузки	от 30А до 3000 А
Количество полюсов	2-х и 3-х и 4-х полюсные
Возможность коммутации нейтрали	
Допустимое напряжение переменного тока	до 600В, 50 Гц или 60 Гц
Время переключения с одного ввода на другой без учета временных задержек	менее 50 мсек
Динамическая стойкость к токам К.З.	200 кА
Имеется возможность ручного (механического) переключения	
Выбор однофазного или трехфазного режима контроля	
Система синфазного переключения нагрузки	

Таблица 12. Инвертор SKN(z)-5000. Технические характеристики

Напряжение питания инвертора, В	48
Выходное напряжение инвертора (ном. мощн.), В	220 (+10%-15%)
Частота выходного напряжения инвертора, Гц	50 / 60
Номинальная выходная мощность инвертора, кВт	3?5
Макс. мощность инвертора (не более 30 сек., напряж. не менее 185 В), кВт	10,5 кВт
КПД инвертора, %	85-90
Время переключения инвертора (сеть/инвертор), мс	4
Масса инвертора, кг	36
Габариты инвертора, мм	195x465x340
Функциональные и конструктивные особенности Инвертора SKN(z)	5000
Форма выходного напряжения 220В	синусоида
Защита от перегрузки инвертора, от короткого замыкания, подключения аккумулятора неправильной полярностью, от перезаряда и полного разряда аккумулятора.	
Система защиты питаемых устройств от импульсных перенапряжений.	
Светодиодная индикация основных режимов работы.	
Система плавного пуска. Постоянное напряжение при заряде АКБ.	

Выводы

В результате представленного проекта можно увидеть, что использование возобновляемых источников энергии способно полностью удовлетворить энергопотребление небольшого жилого комплекса без использования традиционных органических топлив. Предложенные солнечные и ветровые установки практически полностью покрывают необходимое электро-

снабжение и теплоснабжение индивидуального потребителя, особенно в курортный весенне-летне-осенний период. При учете постоянного прироста населения Крыма и особенно Севастополя, а также постоянное увеличение турпотока, предложенные возобновляемые энергосистемы способны значительно сократить потребление углеводородов и улучшить экологическую обстановку полуострова.

Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» № 27/06–31.

Список литературы

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, № 3, С. 153–158.
8. Бордан Д.Ф. Потенциал развития тепловой сол-

нечной 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.

References

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Vologdin S. V. Analiz razlichnykh scenariy 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.
7. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Vol. 55, no. 3, pp. 153–158.
8. 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.

УДК 004.8:621.311

Аналитический обзор интеллектуальной системы управления электрическими сетями России

Н.М. Шайтор¹, Н.А. Яковенко²^{1,2}ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия.¹shaytor1950@mail.ru, ²nik777fort@yandex.ru

Статья поступила 23.04.2021 г.; после доработки 26.04.2021 г

Аннотация

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года предполагает полный переход на интеллектуальное управление режимами работы электрических сетей напряжением от 220 кВ и объектами генерации мощностью от 25 МВт и выше. Это означает, что сложившаяся на данный момент система управления электрическими сетями и объектами генерации будет укрупняться и модернизироваться. В связи с этим в работе сделан аналитический обзор интеллектуальной системы управления электрическими сетями России, рассмотрены её компоненты и перспективы будущего развития.

Ключевые слова: электроэнергетика, интеллектуальная система управления, электрические сети.

Analytical overview of the intelligent electric grid management system of Russia

N.M. Shaytor¹, N.A. Iakovenko²^{1,2} «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.¹shaytor1950@mail.ru, ²nik777fort@yandex.ru

Received 23.04.2021 y.; received in final form 26.04.2021 y.

Annotation

The energy strategy of the Russian Federation for the period up to 2035 involves a transition to 100 percent automatic remote control of operation modes of 220 kV and above electric network facilities and 25 MW and above generation facilities. This means that the current remote control system will be enlarged and modernized. In this regard, the work provides an overview of the problems and prospects of developing the current model of intelligent management of electrical networks in Russia.

Keywords: electric power industry, intelligent control system, electric networks.

Введение

Цифровизация экономики – одна из приоритетных задач, поставленных в ключевых документах, определяющих долгосрочную перспективу развития России. Одним из компонентов цифровой экономики является цифровизация электроэнергетики, и, как следствие, интеллектуальные системы управления электрическими сетями. От выбора стратегии развития интеллектуального управления электрическими сетями

будет зависеть надежность, безаварийность и экономичность работы единой энергетической системы России.

Постановка цели научного исследования

Целью исследования является аналитический обзор существующей системы интеллектуального управления электрическими сетями России, рассмотрение её компонентов и перспектив

будущего развития.

Возможности и требования интеллектуальной системы управления

Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года предполагает переход на 100-процентное автоматическое дистанционное управление режимами работы объектами электрической сети 220 кВ и выше и объектами генерации 25 МВт и выше [1]. Это значит, что сложившаяся на данный момент система дистанционного управления будет укрупняться и модернизироваться.

На сегодняшний день, общая архитектура такой системы предусматривает управление технологией производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии, а также рыночные механизмы управления и систему безопасности от кибератак. Развиваемые системы управления строятся как распределенные иерархические системы. Единая автоматизированная система управления интегрирует средства и подсистемы автоматических и автоматизированных систем управления и регулирования, таких как:

- автоматизированная система диспетчерского управления АСДУ;
- автоматизированная система регулирования частоты и мощности АРЧМ, напряжения АРН;
- релейной защиты РЗ, противоаварийной автоматики ПА;
- информационно-измерительная система коммерческого учёта электроэнергии АИИС КУЭ;
- автоматизированная система управления технологическими процессами АСУ ТП энергетических объектов и систем связи.

Всеобщий переход к интеллектуальной системе управления содержит в себе ряд требований, без которых это невозможно [2]:

1. Повышение степени автоматизации управления в сочетании с эффективными экспертными системами для принятия решений оперативным персоналом.
2. Согласование баланса интересов субъектов электроэнергетики и потребителей электроэнергии при условии минимизации затрат на энергоснабжение и услуги.
3. Максимальное использование возможностей технологической базы энергетики при минимизации различного рода ограничений.
4. Привлечение потребителей к управлению энергосистемой в аварийных ситуациях с

учетом их экономических интересов.

5. Максимально возможную скорость принятия решений по изменению условий использования электроэнергии, в первую очередь в непредвиденных ситуациях.
6. Мониторинг устойчивости системы в реальном времени, динамическое прогнозирование и превентивная реакция на изменение условий внешней среды.
7. Возможность реконфигурации частей системы при аварийных ситуациях с восстановлением нормального режима.
8. Защита систем управления и информационного пространства от целенаправленных электромагнитных воздействий и кибератак.

Несмотря на сложность предъявляемых требований к системе, она способна выполнять целый ряд функций, таких как:

- диагностика неисправностей и уведомление в реальном времени;
- локализация неисправности оборудования в энергосистеме;
- автоматическая реконфигурация сети при коротких замыканиях;
- распределенная генерация с использованием сетевых технологий;
- мониторинг состояния энергосистемы по его предыстории из базы знаний в реальном времени;
- мониторинг запаса статической устойчивости в реальном времени;
- распределенные технологии моделирования, оптимизации и управления на основе вычислительных GRID - сетей;
- ситуационное ассоциативное управление режимом с использованием предыстории состояния энергосистемы;
- интеллектуальные системы управления спросом на основе MAC - технологий мультиагентных систем.

Реализация в России

Однако, выполнение такого широкого профиля функций невозможно без входной информационной базы, основываясь на данных которой, система могла бы принимать верное решение. Поэтому, АО «СО ЕЭС» и Siemens AG в 2007 году заключили контракт на разработку и создание интегрированного информационно-управляющего комплекса оперативно-диспетчерского управления в режиме реального времени с экспертно-расчетными системами приня-

тия решений «SCADA/EMS Системного оператора», способного решить эту задачу.

Для унификации полученных данных был создан оперативно-информационный комплекс (ОИК). В нем реализованы следующие системы и системные возможности:

1. Система мониторинга первичного, вторичного и третичного регулирования мощности с оценкой своевременности отработки заданий (автоматических и оперативных) на изменение мощности электростанций и энергоблоков, используемых для регулирования.
2. Система мониторинга нагрузки, функционирующая на основе телеинформации с объектов электроэнергетики.
3. Система оперативного контроля и анализа уровней напряжения в контрольных пунктах ЕЭС/ОЭС/региональных энергосистем и фактических параметров средств регулирования реактивной мощности для оперативного управления электроэнергетическим режимом ЕЭС России, его планирования, подготовки необходимой отчетной информации по соблюдению заданных диапазонов уровней напряжения в контрольных пунктах.
4. Система межуровневого обмена информацией, которая фиксирует следующие параметры напряжения в контрольных пунктах:
 - величину уровня напряжения с необходимой дискретностью;
 - максимальные и минимальные значения напряжения на заданных интервалах времени;
 - продолжительность нахождения уровня напряжения в заданном диапазоне на заданных интервалах времени;
 - выходы уровня напряжения за пределы заданного для данного контрольного пункта диапазона с необходимой дискретностью и продолжительностью выхода по каждому случаю;
 - выходы уровня напряжения за пределы допустимого с заданной дискретностью и продолжительностью для оборудования 110 — 750 кВ в соответствии со стандартом ОАО «СО ЕЭС» «Правила предотвращения развития и ликвидации нарушения нормального режима электрической части энергосистем»;
 - интервалы между выходами уровня напряжения за пределы допустимого для оборудо-
- вания и число случаев выхода в контролируемый период;
- выходы уровня напряжения за пределы минимально допустимого и аварийно допустимого по устойчивости с заданной дискретностью и продолжительностью выхода по каждому случаю.
5. Система межуровневого обмена информацией, которая фиксирует по средствам регулирования реактивной мощности (для каждого объекта диспетчеризации):
 - величину генерируемой (потребляемой) реактивной мощности с необходимой дискретностью;
 - выход величины генерируемой (потребляемой) реактивной мощности за пределы допустимого для данного оборудования диапазона, с заданной дискретностью и продолжительностью (с учетом допустимых перегрузок по времени);
 - номера положений анцапфа (переключателя) автотрансформаторов (трансформаторов);
 - включенное (отключенное) положение средств ступенчатого регулирования реактивной мощности (шунтирующих реакторов, батарей статических конденсаторов).
6. Система мониторинга напряжения, которая обеспечивает:
 - работу предупредительной сигнализации при выходе уровня напряжения за пределы заданного для данного контрольного пункта диапазона или минимально допустимого по устойчивости;
 - работу аварийной сигнализации при выходе уровня напряжения за пределы допустимого для оборудования или аварийно-допустимого по устойчивости;
 - хранение архива всего массива информации заданное время, постоянное хранение архива информации по существенным событиям и автоматическую подготовку отчетов о существенных событиях за заданный период времени и передачу их на верхний уровень управления.

Дальнейшее развитие проекта

Вместе с тем, АО «СО ЕЭС» сформулирован уже следующий концептуальный подход к дальнейшей реализации проекта:

- построение единой системы SCADA, охватывающей все уровни диспетчерского

- управления, на платформе ОИК «СК-200Х»;
- интеграция информационной модели ЕЭС России (ЕИМ), разработанной Siemens AG, с ОИК «СК-200Х», в результате которой доступ к базе данных СИМ и ее актуализация осуществляются в режиме on-line всеми категориями пользователей, с разграничением прав на основе подведомственности объектов диспетчеризации, находящихся в диспетчерском управлении или ведении, и функциональных задач, решаемых на уровнях ЦДУ-ОДУ-РДУ;
- разработка по каждому из уровней диспетчерского управления стандартных наборов EMS/MMS — приложений, используемых для расчетов, анализа электроэнергетических режимов и управлению ими, интеграция приложений с базой данных СИМ через ОИК «СК-200Х», переход к работе с ее использованием;
- установление интерфейсов для взаимодействия со специальными прикладными EMS/MMS - приложениями, не включаемыми в состав проектируемой системы, функциональность которых в значительной степени зависит от темпов и объемов развития и совершенствования нормативно-правовой базы, с возможностью операционного использования базы данных СИМ.

В связи с чем, уже сейчас идёт широкая работа по интеграции на уровнях ЦДУ-ОДУ-РДУ, разработаны ведомственные планы АО «СО ЕЭС» по реализации проекта и дорожная карта [2].

Что же касается потребителей, то федеральным законом от 27 декабря 2018 году №522-ФЗ было установлено, что начиная с 1 января 2021 года – все новое строительство (а именно многоквартирные дома, вводимые в эксплуатацию) должно быть оснащено общедомовыми и индивидуальными приборами учета, обеспечивающими возможность их присоединения к интеллектуальным системам учета электроэнергии, а с 1 января 2022 года – все приборы учета, допускаемые в эксплуатацию, должны быть интеллектуальными – т.е. соответствовать требованиям и минимальному функционалу в соответствии с ПП РФ [3].

Таким образом, появится новый инструмент для аналитики и модернизации системы управления энергетической системой России.

Помимо этого, реализация концепции интеллектуальной системы управления предусматривает повышение управляемости ЕЭС [4]:

- за счет использования устройств гибкого

управления сетями FACTS;

- создания систем группового управления возбуждением (ГУВ) на ТЭС и АЭС (сейчас ГУВ есть только на ГЭС);
- применения асинхронизированных турбо- и гидроагрегатов на ТЭС, ГЭС и АЭС;
- создания автоматических локальных и районных систем управления напряжением и реактивной мощностью с центральным регулятором (для определенной зоны управления).

В частности, в рамках данной концепции, для системы автоматического регулирования частоты и мощности определены следующие направления развития:

- привлечение специальных средств регулирования - ПГУ, ГТУ, накопителей энергии, гидроагрегатов с переменной частотой вращения, обладающих высокой мобильностью к регулированию как частоты, так и перетоков мощности;
- использование устройств гибкого управления FACTS для регулирования и ограничения перетоков мощности по отдельным связям;
- создание адаптивных регуляторов перетоков мощности.

Основными же направлениями работ по развитию автоматической системы управления режимами являются:

- создание систем верификации (обновления и подтверждения) моделей энергосистем с использованием данных СМНР;
- создание цифровых сетевых моделирующих платформ реального времени;
- создание информационных комплексов на базе современных технологий, осуществляющих высокоточное определение и сбор синхронизированных режимных параметров в узлах сети в режиме реального времени и интеграцию полученных данных в единое информационное пространство на базе общих информационных моделей СИМ-моделей (СИМ – common information model);
- создание централизованных систем автоматического управления мощностью генерирующего оборудования;
- создание систем распределенного расчета режимов энергосистем с использованием многоуровневых моделей — на основе сетевых технологий (GRID-технологий);
- разработка алгоритмов выявления предаварийных состояний энергосистем на основе

методов оценивания состояний и параметрической идентификации.

Создание инфраструктуры технологического управления режимами и эксплуатацией оборудования должно предусматривать разработку интегрированной информационно-управляющей системы нового поколения [5, 6, 7]. Эта система должна работать в рамках единой информационной модели на основе стандартизованных протоколов и интерфейсов взаимодействия и осуществлять глобальный мониторинг и контроль функционирования всех секторов ЕЭС: производства, транспортировки, сбыта и потребления электроэнергии, обеспечивая требуемое качество и надежность по всем ЭЭС всех уровней.

Тем не менее, базисом системы является выбор типа стратегии управления. Перспективными с точки зрения применения в интеллектуальной системе управления энергетической системой, являются следующие:

- адаптивное многосвязное оптимальное управление с эталонной моделью;
- оптимальное адаптивное управление с прогнозирующей моделью;
- адаптивные системы с идентификатором;
- адаптивные интеллектуальные системы идентификации;
- обучаемые нейронные сети.

Одним из многообещающих направлений исследований по созданию самовосстанавливающихся энергетических систем является разработка мультиагентных интеллектуальных систем управления для разных уровней управления на основе теории группового управления, что подтверждается опытом других стран. Мультиагентная интеллектуальная система – это система, образованная несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами и используемая для решения проблем, которые невозможно решить с помощью одного агента или монолитной системы.

Однако, на данный момент, существует ряд проблем, с которыми сталкиваются при реализации проекта интеллектуального управления – координация совместных действий с собственниками электроэнергетического оборудования при управлении электросетевыми объектами и планировании развития сети, обмен информацией о планировании инвестиций в развитие сетевой инфраструктуры на долгосрочный период.

Решая эти задачи, которые актуально не только для России, но и для стран Европы, был подготовлен доклад Ассоциацией европейских операторов распределительных сетей, который

освятил ряд важным вопросам реализации проекта интеллектуального управления электрическими сетями [8]. В нем предлагается реализацию проекта интеллектуального управления оценивать по ключевым показателям, наиболее важными из которых для России являются:

1. Наблюдаемость электрической сети – оценка способности поддерживать «надлежащий мониторинг» узлов/ветвей электрической сети;
2. Управляемость электрической сети – оценка способности поддерживать «надлежащий контроль» за состоянием сетевой инфраструктуры;
3. Оперативная управляемость электрической сети – оценка способности осуществлять управление сетевой инфраструктурой в процессе ежедневной/краткосрочной эксплуатации;
4. Планирование интеллектуальной сети – оценка способности использовать процедуры проектирования и планирования для удовлетворения фактических потребностей в развитии электрической сети в среднесрочной и долгосрочной перспективе с учетом рентабельности проектов модернизации сетевой инфраструктуры и наиболее эффективного использования существующих активов;
5. Прозрачность доступа к данным и обмен данными между заинтересованными сторонами – оценка способности обеспечить доступ к данным и обмен данными между заинтересованными сторонами;
6. Интеллектуальное управление активами – оценка использования передовых стратегий, инструментов и методов управления сетевыми активами с упором на мониторинг состояния активов и снижение рисков.

Заключение

Таким образом, энергетическая система Российской Федерации уверенно идёт по пути цифровизации и применения передового опыта. Этому свидетельствует стратегия развития электроэнергетики и принимаемые законодательные акты в сфере энергетики. Одним из ведущих направлений цифровизации энергетики является модернизация системы управления электрическими сетями, заключающееся в создании интеллектуальной системы. Одним из инструментов такой системы являются средства искусственного интеллекта, позволяющие расширить потенциальные возможности системы управления,

реализовать управление объектами с неизвестной математической моделью объекта, повысить их эффективность за счет включения в них процедур распознавания образов, планирования действий и накопления знаний. Своим опытом по созданию такой модели Российская Федерация, в лице АО «СО ЕЭС» активно делится на международных форумах, тем самым привлекает к этому вопросу не только интерес ведущих энергетических компаний, но и создаёт платформу для взаимодействия и обмена опытом. Цифровизация является ведущим фактором динамического развития системы управления электроэнергетикой не только в России, но и во всем мире, где этот вопрос обретает популярность в связи со стремительным развитием децентрализованной системы, основанной на возобновляемых источниках энергии.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года : распоряжение правительства РФ от 09.06.2020 №1523-р. – URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (дата обращения: 11.04.2021).
2. Программа инновационного развития на 2017-2020 годы и на перспективу до 2025 года : решение Совета Директоров АО «СО ЕЭС» протокол от 29.12.2017 №205. – URL: www.so-ups.ru (дата обращения: 11.04.2021).
3. О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в связи с развитием систем учета электрической энергии (мощности) в Российской Федерации : федер. закон от 27.12.2018 №522-ФЗ. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_314661/ (дата обращения: 11.04.2021).
4. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью / под ред. Е.В. Фортובה, А.А. Макарова. М.: ФСК ЕЭС. 2012. – 235 с.
5. Скорректированная Программа инновационного развития ПАО «ФСК ЕЭС» на 2016-2020 годы с перспективой до 2025 года : решение Совета Директоров ПАО «ФСК ЕЭС» протокол от 07.06.2017 №370. – URL: www.fsk-ees.ru (дата обращения: 11.04.2021).
6. Ситников С.А., Шайтор Н.М., Горпинченко А.В., Дубков Е.Л. Анализ проблем энергосистемы с высокой долей солнечной генерации // Вестник ИЖГТУ имени М.Т. Калашникова. 2021. Т. 24. № 1. С. 87-95.
7. Кочетов И.А., Шайтор Н.М. Практика применения программно-вычислительных комплексов и программ для расчета оптимальных конфигураций электрических сетей // Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 2. С. 40-44.
8. Report E.DSO «Smart grid key performance indicators: A DSO respective» 15.03.2021. – URL: https://www.edsoforsmartgrids.eu/wp-content/uploads/20210315_SGI_Report_DSO_Only_final.pdf (дата обращения: 20.04.2021).

References

1. Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035: Order of the Government of the Russian Federation dated 09.06.2020 No. 1523-o. - URL: <http://static.government.ru/media/files/w4sigFOiDjGVDYT4IgsApssm6mZRb7wx.pdf> (case date: 11.04.2021).
2. Innovative development program for 2017-2020 and for the future until 2025: decision of the Board of Directors of SB UES JSC protocol from 29.12.2017 No. 205. - URL: www.so-ups.ru (case date: 11.04.2021).
3. On amendments to certain legislative acts of the Russian Federation in connection with the development of electrical energy (power) accounting systems in the Russian Federation: feder. Act No. 522-FZ of 27.12.2018. - URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_314661/ (case date: 11.04.2021).
4. The concept of an intelligent electric power system of Russia with an active-adaptive network/edited by E.V. Fortova, A.A. Makarova. M.: FGC UES. 2012. – 235 pages.
5. The adjusted Program of innovative development of PJSC "FGC UES" for 2016-2020 with a perspective until 2025: the decision of the Board of Directors of PJSC "FGC UES" protocol from 07.06.2017 No. 370. - URL: www.fsk-ees.ru (case date: 11.04.2021).
6. Sitnikov S.A., Shaitor N.M., Gorpichenko A.V., Dubkov E.L. Analysis of the problems of the power system with a high proportion of solar generation // Vestnik IzhGTU named after M.T. Kalashnikov. 2021. T. 24. No. 1. S. 87-95.
7. Kochetov I.A., Shaitor N.M. The practice of using software and computing systems and programs for calculating the optimal configurations of electrical networks // Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2020. Vol. 6. No. 2. P. 40-44.
8. Report E.DSO «Smart grid key performance indicators: A DSO respective» 15.03.2021. – URL: https://www.edsoforsmartgrids.eu/wp-content/uploads/20210315_SGI_Report_DSO_Only_final.pdf (case date: 20.04.2021).

УДК 621.313.126

Расчет и анализ температурных полей асинхронных двигателей

Н.М. Шайтор¹, А.С. Велиляев².^{1,2}ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия.¹shaytor1950@mail.ru, ²velilyaev1999@bk.ru

Статья поступила 26.04.2021 г.; после доработки 28.04.2021 г.

Аннотация

Проведен обзор основных методов теплового расчета температурных полей асинхронных двигателей. Дан анализ расчета температурных полей асинхронных двигателей, рассмотрены особенности тепловых свойств АД с различными параметрами. Проведено сравнение асинхронных двигателей с короткозамкнутым и двухслойным роторами.

Ключевые слова: температурные поля асинхронных двигателей, методы теплового расчета, тепловые процессы двигателей; тепловые схемы.

Calculation and analysis of temperature fields of asynchronous motors

N.M. Shaytor¹, A.S. Velilyaev².^{1,2} «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.¹shaytor1950@mail.ru, ²velilyaev1999@bk.ru

Received 26.04.2021 y.; received in final form 28.04.2021 y

Annotation

A review of the main methods of thermal calculation of temperature fields of asynchronous motors is carried out. The analysis of the calculation of the temperature fields of asynchronous motors is given, the features of the thermal properties of AD with different parameters are considered. Asynchronous motors with short-circuited and double-layered rotors are compared.

Keywords: temperature fields of asynchronous motors, methods of thermal calculation, thermal processes of motors; thermal schemes.

Введение

При эксплуатации асинхронных двигателей (АД) имеют место тепловые процессы, они сопровождают режимы пуска, торможения, изменения частоты вращения и нагрузки машин [1]. Повышенная температура электрических машин влияет на долговечность изоляции обмоток, на работу подшипников и др. Повышенная температура обмоток вызывает тепловое старение изоляции, приводящее к необратимому снижению электрической и механической прочности.

Постановка цели научного исследования

Целью исследования является обзор основных методов теплового расчета, анализ расчета температурных полей АД и особенностей тепловых свойств АД с различными параметрами.

Методы теплового расчета

В связи с тем, что существует большое разнообразие условий теплоотвода от (АД) существует множество различных методов теплового

расчета [2].

При значительной неравномерности теплового поля используют метод точного или приближенного аналитического решения уравнений для трех или двухмерных температурных полей и численный метод сеток.

Для расчета распределения температуры по длине обмоток и других частей электрических машин используют метод одномерного температурного поля.

Наибольшее распространение получил метод эквивалентных тепловых схем (ЭТС) ввиду его простоты и точности расчета, однако данный метод не дает полную картину температурного поля

Метод основан на использовании тепловых сопротивлений [3], которые соединяются в тепловую сеть, имитирующую реальные пути передачи тепловых потоков в машине, и предполагает аналогию теплового потока с электрическим током, основанную на законе электрического тока и закона теплопроводности сформулированный Фурье [4]:

$$\Delta P = \frac{\lambda \cdot F_T \cdot \Delta \theta}{\delta} = \frac{\Delta \theta}{R_T},$$

$$I = \frac{k \cdot F_{np} \cdot \Delta U}{l} = \frac{\Delta U}{R_z},$$

где F_T – площадь сечения, перпендикулярного распространению теплоты;

λ – коэффициент теплопроводности;

$\Delta \theta$ – падение температуры на длине δ ;

R_T – тепловое сопротивление данного участка на пути теплового потока;

k – удельная электрическая проводимость;

ΔU – разность потенциалов на длине проводника l с сечением F_{np} ;

R_z – электрическое сопротивление.

Тепловой расчёт АД выполняют в два этапа: вначале определяют средние температуры основных элементов методом ЭТС, а затем распределение температуры в активных частях аналитическим методом, используя как граничные условия, полученные ранее данные.

Тепловые величины для расчета асинхронных двигателей

Охлаждение в АД осуществляется путём теплопроводности и конвекции. Источниками тепла являются активные элементы машины, а в качестве охлаждающей используется окружающая среда.

Элементы АД не являющиеся источниками тепловыделений представляются в тепловых

схемах простыми термическими сопротивлениями вида

$$R_\lambda = \delta / \lambda S,$$

где δ – толщина плоской стенки элемента;

λ – коэффициент теплопроводности материала при средней ожидаемой температуре;

S – площадь, через которую проходит поток тепла.

Для элементов, не являющихся источниками тепловыделений:

$$R_\lambda = \delta / 3 \lambda S.$$

Так же в местах контакта разнородных тел могут вводиться контактные термические сопротивления.

Узлы тепловой схемы имитируют отдельные части АД. Если в какой-либо части присутствуют распределенные по объему источники теплоты, то при составлении эквивалентной тепловой схемы они заменяются сосредоточенным источником (источником теплового потока), помещенным в узел, имитирующий эту часть. Узлы с внутренним тепловыделением на схеме обозначаются кружками, узлы без тепловыделения – точками.

За счет конвективного теплообмена отводится вся теплота АД, в машинах с воздушным охлаждением конвективные термические сопротивления обуславливают от 50 до 80 % превышения температуры обмоток.

Связи элементов машины с охладителем, где осуществляется передача тепла конвекцией, выражается конвективным термическим сопротивлением:

$$R_\alpha = 1 / \alpha S,$$

где α – средний коэффициент теплоотдачи на поверхности площадью S .

Расчёт коэффициента теплоотдачи α представляет значительные трудности.

Аналитическое решение задач конвективного теплообмена представляет трудную задачу, так как зависимость коэффициента теплоотдачи от определяющих его параметров является неоднозначной.

Источниками теплоты в АД являются активные части: обмотки статора и ротора и сердечники статора. Потери в электрических машинах делят на четыре группы: электрические в обмотках, магнитные на гистерезис и вихревые токи, механические на трение и перемещение охлаждающей среды, добавочные в стали и обмотках.

Основная часть потерь определяется в ходе электромагнитного расчёта либо экспериментально и при анализе тепловой системы предполагается заданной.

Электрические потери в обмотках (меди)

определяются сопротивлением обмотки и квадратом тока в них:

$$P_M = I_2 r = I^2 \rho l / F.$$

Потери в обмотке (меди) статора и ротора соответственно:

$$P_{M,ст} = 3I_{\phi,ст}^2 r_{\phi,ст},$$

$$P_{M,рот} = s(P_3 - P_{M,ст} - P_c - P_{доб}),$$

где s – скольжение;

P_3 – мощность, забираемая из сети;

P_c – основные потери в стали;

$P_{доб}$ – добавочные потери.

Магнитные потери связаны с перемагничиванием активной стали от основного потока машины и определяются:

$$P_c = k(P/M)_{10/50} B^2 (f/50)^{1,3} M,$$

где k – поправочный коэффициент;

$(P/M)_{10/50}$ – удельные потери в стали на единицу массы при индукции 1Тл и частоте 50 Гц;

B – среднее значение индукции;

f – частота; M – масса сердечника.

В таблице 1 приведены результаты исследования потерь для закрытого самообдуваемого АД 21ДМШ112 в исполнении с короткозамкнутым и двухслойным ротором, проведенных при номинальной нагрузке базового двигателя с короткозамкнутым ротором, равной 3 кВт.

Таблица 1 Тепловые потери двигателя 21ДМШ112 с различными роторами

№ п/п	Потери и источники тепловыделений двигателя	Обозначение	Потери, Вт		АДДР к АДКР
			АДКР	АДДР	
1	В пазовых частях обмотки статора	$P_{M,п}$	181,28	311,09	1,72
2	В лобовых частях обмотки статора	$P_{M,л}$	120,85	201,61	1,67
3	Суммарные в обмотках статора	$P_{M,ст}$	302,13	512,7	1,70
4	В сердечнике статора и добавочные	$P_{с,ст}$	136,18	205,13	1,51
5	В обмотках (меди) ротора	$P_{M,рот}$	96,71	190,30	1,97
6	Вентиляционные	$P_{вент}$	91,54	91,54	1,00
7	Суммарные потери на тепловыделение	P_{Σ}	626,63	999,67	1,60

При такой нагрузке суммарные потери двигателя с двухслойным ротором (АДДР) 1,6 раза превышают потери короткозамкнутого двигателя (АДКР). Наибольшее превышение потерь в 1,97 раза наблюдается в роторе и в 1,7 раза в обмотках статора двигателя с двухслойным ротором. Это объясняется тем, что двигатель с двухслойным ротором, как и другие двигатели с повышенным скольжением, имеет пониженный КПД в длительном режиме работы, по сравнению с короткозамкнутыми двигателями.

Из таблиц видно, что при нагрузке двигателя с двухслойным ротором, равной 80% номинальной нагрузки, его потери становятся практи-

чески равными потерям двигателя с короткозамкнутым ротором.

Эквивалентные тепловые схемы АД

Связи между узлами эквивалентной тепловой схемы машины, устанавливаемые на основе анализа возможных путей теплопередачи, выражают наборами термических сопротивлений, отражающих передачу тепла теплопроводностью, конвекцией, а так же посредством контактного теплообмена в зоне стыка сопряженных конструктивных элементов АД.

Для решения общей задачи стационарного нагрева применяется метод ЭТС. При этом тепловая система с непрерывно распределенными параметрами заменяется эквивалентной системой узлов, между которыми устанавливаются сосредоточенные связи, определяемые соответствующими процессами теплообмена

В узлы ЭТС вводятся соответствующие тепловыделения, осредненные по рассматриваемому объёму элемента; зависимость потерь от температуры учитывается также осредненно. ЭТС для наиболее распространенных закрытых обдуваемых двигателей малой мощности, к которым относится двигатель 21ДМШ112, составляется на основе анализа возможных путей перехода тепла от активных частей к окружающей среде.

Основные тепловыделения в асинхронных двигателях имеют место в обмотках статора и ротора и основные потоки в двигателях малой мощности проходят от обмотки статора через сердечник к станине, где снимаются воздушным потоком, создаваемым вентилятором внешнего обдува (рис. 1).

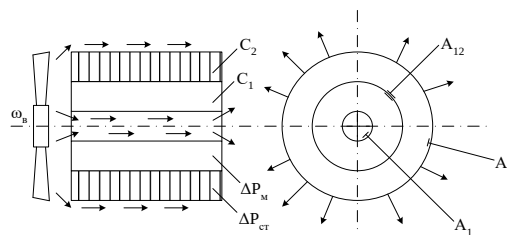


Рис 1. Упрощенная модель двигателя как тела нагрева

Часть теплоты от лобовых частей обмотки и от ротора переносится к щитам и «свисающим» частям станины воздухом (рис. 2), циркулирующим вблизи подшипниковых щитов под действием роторных лопаток. Кроме того, происхо-

дит переход тепла от ротора к статору через воздушный зазор между ними.

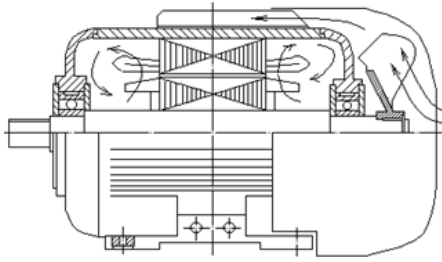


Рис 2. Общий вид двухконтурной вентиляции асинхронного двигателя 21ДМШ112.

Полная ЭТС (рис. 3) закрытого обдуваемого двигателя учитывает подогрев воздуха по длине станины (однаправленные проводимости со стрелками, тепловой поток направлен навстречу потоку охладителя) и позволяет определить превышение температуры различных частей двигателя.

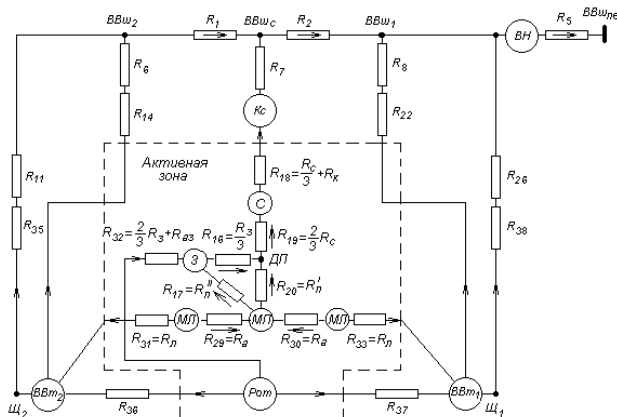


Рис. 3. Полная ЭТС асинхронного двигателя

Теплота пазовых частей обмотки отводится к зубцам и дну паза через внутреннее сопротивление $R_{вт,л}$ и сопротивление пазовой изоляции $R_{и,л}$. Другая часть теплоты лобовых частей отводится к воздуху через сопротивления $R_{л}$, каждое из которых является суммой внутреннего сопротивления обмотки $R_{вт,л}$, сопротивления изоляции $R_{и,л}$ и конвективного сопротивления $R_{\alpha,л}$. К зубцам теплота поступает также через воздушный зазор от ротора через сопротивление $R_{\alpha,з}$, а от спинки в станину (корпус) – через контактное сопротивление $R_{к}$.

Перепад температуры в зубце и спинке, вызываемый выделившейся в них теплотой, моделируется термическими сопротивлениями.

Чтобы учесть перепад температуры, вызываемый в этих элементах теплотой, поступающей «извне», перед узлами 3 и С введены сопротивления, равные удвоенному значению.

Эквивалентной тепловой схеме из n узлов, моделирующей электромашину как тепловую систему, отвечает совокупность алгебраических уравнений:

$$\sum_{k=1}^n a_{i,k} T_k = P_i,$$

где $a_{i,k}$ – элементы матрицы;

T_k – температура k -го узла;

P_i – потери в узле i .

Потери в узлах $P_i = P'_i + P_{i0}$ состоят из потерь P'_i , не зависящих от температуры, и потерь P_{i0} , которые зависят от температуры. Последние подсчитываются при температуре окружающей среды.

Для детального расчета значений температур используют подробные эквивалентные тепловые схемы [5]. Система уравнений для таких схем будет иметь вид:

$$P_1 = \left(\sum_{k=1}^{m(k \neq 1)} \Lambda_{k1} \right) \cdot (\theta_1 - \theta_B) - \sum_{k=1}^{m(k \neq 1)} [\Lambda_{k1} \cdot (\theta_k - \theta_B)],$$

$$P_2 = \left(\sum_{k=1}^{m(k \neq 2)} \Lambda_{k2} \right) \cdot (\theta_2 - \theta_B) - \sum_{k=1}^{m(k \neq 2)} [\Lambda_{k2} \cdot (\theta_k - \theta_B)],$$

$$\dots$$

$$P_m = \left(\sum_{k=1}^{m(k \neq m)} \Lambda_{km} \right) \cdot (\theta_m - \theta_B) - \sum_{k=1}^{m(k \neq m)} [\Lambda_{km} \cdot (\theta_k - \theta_B)].$$

В данном случае показана система уравнений в установившемся режиме, где:

m – количество узлов эквивалентной тепловой схемы;

θ_B – температура воздуха снаружи машины;

$\Lambda_{ki} = 1/R_{ki}$ – тепловая проводимость соответствующего участка схемы;

P_i – потери в i -ом узле.

Средние температуры структурных элементов различных асинхронных двигателей

При поверочных расчётах достаточную точность расчёта дают простые приведённые ЭТС на 4 – 6 узлов, которые пригодны для «ручного» счёта. Приведённую ЭТС получают из развёрнутой, пренебрегая подогревом охлаждающего воздуха по длине машины и различной интенсивностью обдува щитов. В приведённую ЭТС (рис.4) включены лобовая МЛ и пазовая МП части обмотки (меди) статора, сердечник статора

ССт, зубцовая зона ротора Рот, внутренний воздух ВВт и корпус К – станина и щиты. В узлы ЭТС введены соответствующие потери (для обмоток – при ожидаемой температуре, в узлы ССт и Рот – основные и добавочные, в узел ВВт – механические и внутренние вентиляционные).

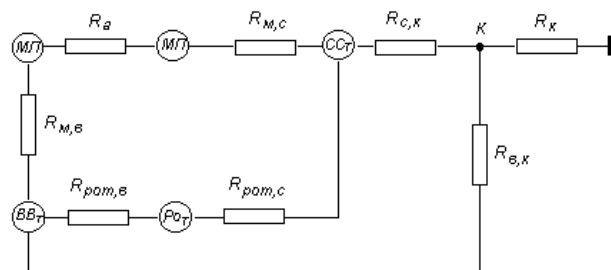


Рис 4. Приведённая эквивалентная тепловая схема асинхронного двигателя

Корпус подключён к внешнему воздуху, превышение температуры которого равно половине подогрева:

$$\Delta T_{в,вш} = \theta_{в,вш} / 2 \sum P / 2C_p \rho Q,$$

где $\sum P$ – сумма потерь.

Чтобы облегчить решение системы уравнений, отвечающей ЭТС, превышения средней температуры узлов МЛ, МП, ССт, Рот, ВВт отсчитывают от превышения температуры корпуса, равного:

$$\Delta T_k = \sum P (R_k + 1/2C_p \rho Q).$$

Тогда система уравнений поля стационарных температур для АД согласно [6] принимает вид:

$$\begin{aligned} (\Lambda_a + \Lambda_{м,в})\Delta T_{м,л} - \Lambda_a\Delta T_{м,л} - \Lambda_{м,в}\Delta T_{в,вт} &= P_{м,л}; \\ (\Lambda_a + \Lambda_{м,с})\Delta T_{м,л} - \Lambda_a\Delta T_{м,л} - \Lambda_{м,с}\Delta T_{с,ст} &= P_{м,л}; \\ (\Lambda_{м,с} + \Lambda_{рот,с} + \Lambda_{с,к})\Delta T_{с,ст} - \Lambda_{м,с}\Delta T_{м,л} - \Lambda_{рот,с}\Delta T_{рот} &= P_{с,ст}; \\ (\Lambda_{рот,в} + \Lambda_{рот,с})\Delta T_{рот} - \Lambda_{рот,в}\Delta T_{в,вт} - \Lambda_{рот,с}\Delta T_{с,ст} &= P_{рот}; \\ (\Lambda_{м,в} + \Lambda_{рот,в} + \Lambda_{в,к})\Delta T_{в,вт} - \Lambda_{м,в}\Delta T_{м,л} - \Lambda_{рот,в}\Delta T_{рот} &= P_{в,вт}. \end{aligned}$$

Систему уравнений решают относительно ΔT_i , а превышения температуры элементов двигателя относительно окружающей среды находят добавлением превышения температуры корпуса ΔT_k к полученным значениям ΔT_i .

В таблице 2 приведены данные расчёта термических сопротивлений двигателей 21ДМШ112 в исполнении с короткозамкнутым и двухслойным ротором для приведённой эквивалентной тепловой схемы (рис. 4).

В таблице 3 приведены результаты расчёта превышения средних температур основных элементов этих двигателей над окружающей средой, при номинальной нагрузке базового двигателя, равной 3 кВт. Превышения температур

двигателя с двухслойным ротором выше по сравнению с короткозамкнутым двигателем в роторе в 1,7 раза, в сердечнике статора в 1,25 раза, во внутреннем воздухе в 1,21 раза, в обмотках статора в 1,14 раза.

Таблица 2 Средние термические сопротивления двигателей с различными роторами

№ п/п	Расчётные термические сопротивления приведённой эквивалентной тепловой схемы двигателя	Обозначение	Сопротивление, К/Вт	
			АДКР	АДДР
1	Аксиальное – меди статора	R _a	0,0236	0,0236
2	Медь статора – сердечник статора	R _{м,с}	0,1950	0,1950
3	Сердечник статора – корпус	R _{с,к}	0,0245	0,0245
4	Радиальное – корпуса двигателя	R _к	0,0472	0,0472
5	Внутренний воздух – медь статора	R _{м,в}	0,4685	0,4685
6	Внутренний воздух – ротор	R _{рот,в}	0,3860	0,3975
7	Ротор – воздушный зазор – сердечник статора	R _{рот,с}	0,1554	0,3404
8	Внутренний воздух – корпус	R _{в,к}	0,1260	0,1260

Таблица 3 Превышение средней температуры двигателей с различными роторами

№ п/п	Расчётные термические сопротивления приведённой эквивалентной тепловой схемы двигателя	Обозначение	Сопротивление, К/Вт	
			АДКР	АДДР
1	Аксиальное – меди статора	R _a	0,0236	0,0236
2	Медь статора – сердечник статора	R _{м,с}	0,1950	0,1950
3	Сердечник статора – корпус	R _{с,к}	0,0245	0,0245
4	Радиальное – корпуса двигателя	R _к	0,0472	0,0472
5	Внутренний воздух – медь статора	R _{м,в}	0,4685	0,4685
6	Внутренний воздух – ротор	R _{рот,в}	0,3860	0,3975
7	Ротор – воздушный зазор – сердечник статора	R _{рот,с}	0,1554	0,3404
8	Внутренний воздух – корпус	R _{в,к}	0,1260	0,1260

Из таблиц видно, что при снижении мощности двигателя с двухслойным ротором на 20% по сравнению с номинальной мощностью базового двигателя с короткозамкнутым ротором, превышения температур двигателя с двухслойным ротором практически выравниваются с базовым двигателем.

При сравнении результатов расчёта с данными испытаний серийных машин разброс опытного превышения температуры из-за отклонений в технологии изготовления и характеристиках материалов составляет для рассматриваемых машин $\pm 18\%$.

Аксиальное поле температур в роторе асинхронного двигателя

Особенности конструкции и физических процессов в двигателе с двухслойным ротором приводят к повышенным тепловыделениям в активном цилиндре, а увеличение воздушного за-

зора - к существенному повышению термического сопротивления между статором и ротором, ухудшению отвода тепла и нагреву ротора.

Локальные зоны высоких температур в роторе существенно влияют на рабочие и магнитные и характеристики асинхронного двигателя.

По средним температурам основных элементов, рассчитанным по методу эквивалентных тепловых схем, определяют распределение температуры в активных частях двигателя аналитическим методом, используя как граничные условия, полученные ранее данные.

Материал активного цилиндра АДДР из сплава железо-медь имеет пониженную точку Кюри $\theta_K \approx 725^\circ\text{C}$, по сравнению с АДКР из кремнистой стали, где $\theta_K \approx 760^\circ\text{C}$.

Дифференциальные уравнения для расчета теплопроводности активного цилиндра:

$$d^2T_1/dx_1^2 = m_1^2(T_1 - k_1) + n_1,$$

$$d^2T_2/dx_2^2 = m_2^2T_2,$$

$$d^2T_3/dx_3^2 = m_3^2(T_3 - \vartheta_B),$$

где T_1, T_2, T_3 - аксиальное распределение температуры активного цилиндра, лопаток с обеих сторон ротора по координате x ;

ϑ_B - температура внутреннего воздуха на выходе лопаток, отсчитываемая, как и T_1, T_2, T_3 , от температуры окружающей среды;

$k_1 = \vartheta_B/l_1$ - отношение температуры на выходе из лопаток к длине ротора;

m_1, m_2, m_3 - параметры, учитывающие термические сопротивления элементов;

n_1 - параметр, учитывающий тепловыделение в роторе.

Результаты исследования аксиального распределения температуры при различных нагрузках двигателя 21ДМШ112 S2 в исполнении с двухслойным ротором показано на рис. 4.2 (точка Кюри материала активного слоя ротора СМ20 $\theta_K \approx 725^\circ\text{C}$). За номинальную нагрузку принята номинальная нагрузка базового двигателя с короткозамкнутым ротором $P_n = 3\text{ кВт}$.

В установившихся длительных режимах работы АДДР аксиальное поле температур в роторе неравномерно. Наибольшие температуры наблюдаются в центральной части ротора, при этом максимумы температур смещаются в направлении обдува двигателя и с повышением нагрузки приближаются к точке Кюри активного сплава. Данный фактор оказывает существенное влияние на теплофизические характеристики ротора и на рабочие характеристики электрической

машины.

Заключение

Из всех методов теплового расчета асинхронных двигателей наибольшее распространение получил метод ЭТС, хотя возможно проведение расчетов и другими методами.

Расчет температурных полей является сложной задачей, в особенности из-за учета множества параметров, таких как термические сопротивления, тепловые потери, коэффициент теплоотдачи, зависимость которых от определяющих их параметров является функцией многих переменных.

Использование для расчета приведенных ЭТС, дает упрощение расчетов. Приведенные ЭТС, содержащие пять - шесть узлов, обеспечивают хорошую точность определения средних температур при использовании достоверных значений потерь, коэффициентов теплопроводности и теплоотдачи. Общая точность всего теплового расчета АД определяется, главным образом, точностью задания исходных данных и для машин общего применения она составляет $\pm 10\%$ при использовании метода ЭТС для определения средних температур и аналитического метода для последующего расчета распределения температур.

В длительном режиме двигателя с короткозамкнутым ротором имеют меньшие тепловые потери по сравнению с двухслойным ротором, так как АДКР имеет выше КПД ротора. В повторно-кратковременных режимах, при частых пусках и реверсах, наблюдается обратная картина, так как двухслойный ротор приводит к снижению пусковых токов. Однако при 80% номинальной мощности двигателя с двухслойным ротором превышения температур двигателей в длительном режиме имеют примерно одинаковую величину.

Список литературы

1. 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. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-95-101
2. Сипайлов Г.А., Санников Д.И., Жадан В.А. Тепловые, гидравлические и аэродинамические расчеты в электрических машинах. - М.: Высш. шк.,

1989. – 239 с.
3. Алексеев А.Е. Конструкция электрических машин. – М.: ГЭИ, 1949. – 562 с.
 4. Ковалев В.З. Моделирование электротехнических комплексов и систем как совокупности взаимодействующих подсистем различной физической природы: Дисс. д-ра техн. наук: 05.09.03/ОмГТУ. – Омск, 2000. – 338 с.
 5. Борисенко А.И., Костиков А.И., Яковлев А.И. Охлаждение промышленных электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.
 6. Беспалов В.Я., Мощинский Ю.А., Цуканов В.И. Упрощенная математическая модель нестационарного нагрева и охлаждения обмотки статора асинхронного двигателя. // Электричество. – 2003. – №4. – С. 20–26.

References

1. Shaytor N.M., Gorpichenko A.V. Dinamicheskiye rezhimy asinkhronnykh dvigateley v privodakh energeticheskikh sistem i kompleksov // Vestnik IzhGTU imeni M.T. Kalashnikova. 2020. T. 23. № 4. S. 95-101. DOI: 10.22213/2413-1172-2020-4-95-101
2. Sipailov G. A., Sannikov D. I., Zhadan V. A. Thermal, hydraulic and aerodynamic calculations in electric machines. - Moscow: Higher School of Economics, 1989. - 239 p.
3. Alexsev A. E. The design of electric machines. - M.: GEI, 1949. - 562 p.
4. Kovalev V. Z. Modeling of electrotechnical complexes and systems as a set of interacting subsystems of different physical nature: Diss. doctor of Technical Sciences: 05.09.03 / OmSTU. – Omsk, 2000. – 338 p.
5. Borisenko A., Kostikov, A. I., Yakovlev A. I. Cooling of industrial electrical machinery. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 296 p.
6. Беспалов В. Я., Мощинский, Ю. А., Цуканов В. И. Simplified mathematical model of the transient heating and cooling of the stator winding of the induction motor. // Electricity. - 2003. - No. 4. - p. 20-26.

УДК 621.313.126

Обзор современных отечественных систем возбуждения АО "Силовые машины"

Н.М. Шайтор¹, К.К. Санников².^{1,2}ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия.¹shaytor1950@mail.ru, ²sannikov26rus@gmail.com

Статья поступила 29.04.2021 г.; после доработки 30.04.2021 г

Аннотация

Проведен обзор основных отечественных систем возбуждения, производимых компанией АО "Силовые Машины". Дан анализ областей применения тиристорных систем возбуждения, рассмотрены их достоинства и недостатки. Определены преимущества компании АО "Силовые Машины", осуществляющей комплексное проектирование, монтаж, обслуживание и модернизацию своей продукции, рассмотрены перспективы применения и развития систем возбуждения в современных установках электрической генерации.

Ключевые слова: системы возбуждения синхронных генераторов, системы независимого возбуждения, системы тиристорные самовозбуждения; системы бесщеточные диодные.

Overview of modern domestic excitation systems JSC "Power machines"

N.M. Shaytor¹, K.K. Sannikov².^{1,2} «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,
Sevastopol, 299053, Russia.¹shaytor1950@mail.ru, ²sannikov26rus@gmail.com

Received 02.04.2021 y.; received in final form 20.05.2021 y.

Annotation

A review of the main domestic excitation systems produced by «Power Machines» is carried out. The analysis of the fields of application of thyristor excitation systems is given, their advantages and disadvantages are considered. The advantages of the company «Power Machines», which carries out integrated design, installation, maintenance and modernization of its products, are determined, the prospects for the application and development of excitation systems in modern electric generation plants are considered.

Keywords: synchronous generator excitation systems, independent excitation systems, thyristor self-excitation systems; brushless diode systems.

Введение

Большая часть электроэнергии, необходимая для жизнедеятельности человечества, вырабатывается синхронными генераторами (СГ). Генераторы этого типа используются на тепловых и атомных электростанциях, на гидроэлектростанциях и в ветроэлектрических установках. В

энергетике мощность синхронных машин достигает 1500 МВт (турбогенераторы в двухполюсном исполнении) и 2000 МВт (турбогенераторы в четырехполюсном исполнении).

В автономных электроэнергетических установках используются синхронные генераторы меньшей мощности. Неотъемлемым атрибутом

СГ являются системы их возбуждения (СВ).

АО «Силовые машины» – крупнейшая энергомашиностроительная компания России, имеющая международный опыт и компетенцию в области проектирования, изготовления и комплектной поставки оборудования для тепловых и атомных электростанций, а также для различных отраслей промышленности, транспортной и судовой энергетики.

Компания АО «Силовые машины» создает эффективные комплексные проекты для мировой энергетики, опираясь на полуторавековой опыт производственных активов компании и применяя новейшие достижения науки и техники.

Оборудование, изготовленное и поставленное предприятиями компании, работает в 57 странах мира и в настоящее время насчитывает более 300 000 МВт установленной мощности

Современные системы возбуждения СГ

Возбуждение электрической машины можно определить, как создание в ней основного магнитного потока и его регулирование с целью поддержания заданного напряжения при изменении нагрузки.

В течение длительного исторического времени использовались СВ амплитудно-фазового компаундирования, работающие на принципах электромагнитного сложения сигналов управления и содержащие массивные стальные сердечники с электрическими обмотками.

Однако с развитием электронной промышленности для возбуждения СГ начали широко применять изделия силовой электроники, которые вытеснили электромагнитные СВ.

Мощные тиристоры используются в системах силовой электроники на многих предприятиях, в том числе в СВ производства АО «Силовые машины». Возбудители этой фирмы успешно эксплуатируются на 140 крупных электростанциях мира.

Транзисторные СВ для СГ пока не имеют широкого распространения. Одна из причин заключается в том, что модули IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) выпускаются на меньшие напряжения и токи (параметры наиболее мощных модулей – 6500 В, 600 А) [6]. Однако есть примеры развития этого направления техники. Имеются указания на транзисторные системы независимого возбуждения СГ в каталоге изделий фирмы Siemens [3], в книге Boldea [4].

Транзисторные СВ применяются для управления асинхронизированными машинами в ветро

энергетических установках, в гидроаккумулирующих электростанциях. Исследуются перспективы применения транзисторных СВ для СГ традиционного исполнения.

В зависимости от мощности электростанции и других условий системы возбуждения СГ в соответствии с ГОСТ 21558-2000 [5] могут быть различных типов.

Компания АО «Силовые Машины» изготавливает следующие типы систем возбуждения: системы тиристорные самовозбуждения (СТС); системы тиристорные независимые (СТН); системы диодные независимые (СДН); системы бесщеточные диодные (СБД) [1].

Целью исследования является обзор основных отечественных систем возбуждения, анализ их достоинств и недостатков, а также перспектив их применения и развития в современных установках электрической генерации.

Тиристорные системы возбуждения СГ

Системы независимого возбуждения (СТН).

Если на электростанции создана надежная сеть собственных нужд, имеющая основное и резервное питание, то возбуждение СГ можно осуществлять от этой сети.

Для примера на рисунке 1. изображена тиристорная независимая система возбуждения (СТН), которая поставляется АО «Силовые машины».

СТН предназначены для питания обмоток возбуждения крупных турбо- и гидрогенераторов выпрямленным регулируемым током. В отличие от других систем самовозбуждения, в СТН тиристорный выпрямитель главного генератора получает питание от независимого источника напряжения переменного тока промышленной частоты – вспомогательного синхронного генератора (ГЕ), вращающегося на одном валу с главным генератором. При этом вспомогательный генератор возбуждается по схеме самовозбуждения.

СТН обладает высоким быстродействием, обеспечивает быстрое снятие возбуждения. Другое достоинство СТН – независимость возбуждения от длительности и удаленности коротких замыканий в энергосистеме. К недостаткам СГ с СТН можно отнести наличие щеток.

На рисунке 1 изображены: AVR – автоматический регулятор возбуждения; AVR - GE – автоматический регулятор возбуждения вспомогательного генератора; G – генератор; GE – вспо-

могательный генератор; КМ – контактор начального возбуждения; QE – автомат гашения поля; FV – тиристорный разрядник; UE – устройство начального возбуждения; TE – выпрямительный трансформатор; TV-GE – измерительный трансформатор напряжения вспомогательного генератора; TA, TV – измерительные трансформаторы тока и напряжения генератора.

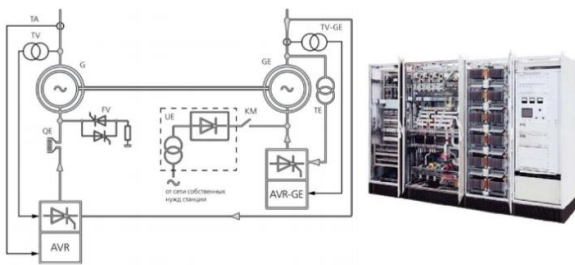


Рис 1. Система тиристорная независимая СТН.

Параметры СТН не зависят от процессов, протекающих в энергосистеме. Благодаря своей конструкции СТН обеспечивает:

- независимость возбуждения от длительности и удаленности коротких замыканий и других возмущений в энергосистеме;
- высокую скорость нарастания напряжения возбуждения;
- быстрое снятие возбуждения за счет изменения полярности напряжения возбуждения.

Системы самовозбуждения СГ

Системы тиристорные самовозбуждения (СТС).

Ко многим системам генерации электроэнергии предъявляется требование к обеспечению их автономной работы. Независимость СГ от других устройств электроснабжения обеспечивается при реализации в системах структур самовозбуждения. СГ со статическими системами самовозбуждения поставляются многими известными фирмами.

В качестве примера рассматривается система тиристорные самовозбуждения. На рис. 2 представлена схема тиристорной системы самовозбуждения типа СТС для мощных турбо- и гидрогенераторов АО «Силовые машины».

СТС предназначены для питания обмоток возбуждения турбо- и гидрогенераторов выпрямленным регулируемым током. Питание тиристорного выпрямителя осуществляется через трансформатор (ТЕ), подключенный к главным выводам генератора. Для запуска генератора предусмотрена цепь начального возбуждения

(UE), которая автоматически формирует кратковременный импульс напряжения на обмотке ротора, до появления ЭДС обмотки статора генератора, достаточной для поддержания устойчивой работы тиристорного преобразователя в цепи самовозбуждения.

На этом же рисунке представлена фотография ПГУ-450, на которой установлены турбогенераторы ТФГ-160 с возбудителями типа СТС.

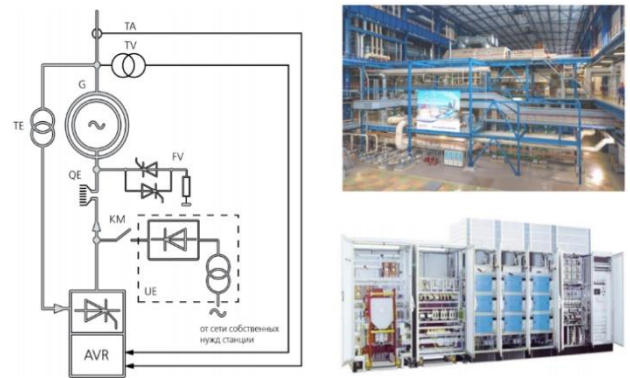


Рис 2. Система самовозбуждения СТС генератора ТФГ-160 с оборудованием ПГУ-450.

На рисунке 2 изображены: AVR – автоматический регулятор возбуждения; G – генератор; КМ – контактор начального возбуждения; QE – автомат гашения поля; FV – тиристорный разрядник; UE – устройство начального возбуждения; TE – выпрямительный трансформатор; TA, TV – измерительные трансформаторы тока и напряжения генератора.

Питание цепей начального возбуждения осуществляется как от стационарной аккумуляторной батареи, так и от источника переменного тока собственных нужд электростанции. Защита ротора от перенапряжений выполняется на основе быстродействующих тиристорных разрядников (FV).

Интенсивное гашение поля генераторов в нормальных условиях эксплуатации достигается за счет перевода тиристорного преобразователя в инверторный режим изменением полярности напряжения возбуждения. Экстренное снятие возбуждения в аварийных режимах обеспечивается автоматом гашения поля (QE) – электрическим аппаратом специальной конструкции, который при срабатывании производит оптимальное гашение поля генератора, заключающееся в минимизации времени гашения поля при соблюдении предельно допустимой по условиям электрической прочности изоляции величине напряжения на обмотке возбуждения.

Бесщеточные системы возбуждения СГ

При возбуждении СГ через контактные кольца необходимо обслуживание этих колец (замена щеток, удаление угольной пыли, шлифовка колец). При большой мощности машин увеличивается диаметр контактных колец и угольные щетки изнашиваются быстрее. При выполнении СГ на повышенную скорость вращения также повышается износ щеток, необходима более точная балансировка ротора. Указанные недостатки устраняются при использовании бесщеточных систем возбуждения (СБД)

Применение бесщеточных возбудителей благодаря их главному достоинству – отсутствию скользящего контакта в цепи обмотки ротора турбогенератора – позволяет обеспечить возбуждение сверхмощных машин, токи возбуждения которых превышают 5500 А. Использование бесщеточных систем для возбуждения турбогенераторов приводит к существенному уменьшению массогабаритных показателей аппаратуры возбуждения.

СБД предназначены для питания обмоток возбуждения турбогенераторов выпрямленным регулируемым током. Бесщеточный возбудитель представляет собой синхронный генератор обращенного типа, якорь которого с обмоткой переменного тока и диодным выпрямителем жестко соединен с ротором турбогенератора. Обмотка возбуждения возбудителя расположена на статоре возбудителя. Регулирование возбуждения генератора осуществляется управлением тока обмотки возбуждения возбудителя.

Типовой комплект системы включает в себя автомат гашения поля (QE), тиристорный разрядник (FV) и два преобразовательно-регулирующих канала (AVR-1 и AVR-2), один из которых находится в активном режиме (AVR-1), другой (AVR-2) – в горячем резерве. В частном случае основной канал регулирования получает питание от выпрямительного трансформатора, подключенного к главным выводам генератора, резервный – через трансформатор от шин собственных нужд электростанции. Осуществляется поставка турбогенераторов (мощностью до 660 МВт) в комплекте с бесщеточной системой возбуждения и подвозбудителем с постоянными магнитами (PMG – permanent magnet generator). Силовые преобразовательные каналы могут быть выполнены на основе IGBT-транзисторов или тириستоров, регулирующие каналы – цифро-

вые, на базе сертифицированного автоматического регулятора возбуждения типа AVR-45M.

На рис. 3 представлена схема бесщеточного возбуждения СГ, разработанного в АО «Силовые машины». На схеме изображено: AVR-1, AVR-2 – автоматические регуляторы возбуждения основного и резервного каналов соответственно; G – генератор; GE – возбудитель; QS1, QS2, QS3, QS4 – разъединители; QE – автомат гашения поля; FV – тиристорный разрядник; TE1, TE2 – выпрямительные трансформаторы; TA1, TA2, TV1, TV2 – измерительные трансформаторы тока и напряжения основного и резервного каналов; TAf1, TAf2 – датчики тока возбуждения возбудителя.

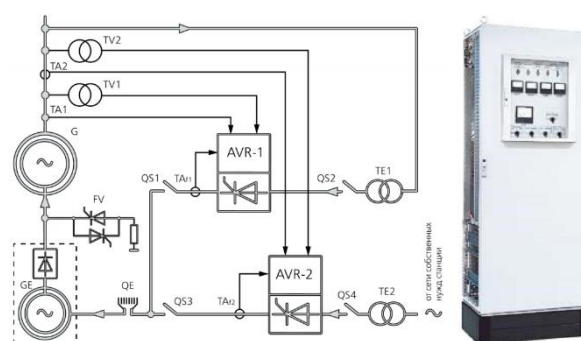


Рис 3. Система бесщеточная диодная СБД с тиристорным возбуждением возбудителя

Заключение

Из анализа материалов, посвященных обзору современных отечественных систем возбуждения АО "Силовые Машины", с учетом опыта разработок и исследований компании, вытекают следующие преимущества систем возбуждения.

1. Максимальная безопасность обслуживающего персонала и оборудования обеспечивается комплексом специальных мероприятий, в том числе применением оптических кабелей и тиристорных преобразователей выкатной конструкции.
2. Удобство обслуживания щитов возбуждения достигается сочетанием блочно-модульной конструкции, обеспечивающей удобный доступ к любому элементу щита, с рациональным расположением органов управления, сигнализации, приборов и контрольных точек.
3. Разнообразие конструктивных исполнений систем охлаждения тиристорных преобразо-

вателей: водяное, принудительное воздушное или естественное воздушное.

4. Улучшенный дизайн щитов с учетом европейского стандарта эргономических характеристик достигается использованием современных конструкционных материалов.

Электромашинные системы возбуждения, выпущенные предприятием АО «Силовые Машины» более полувека назад и находящиеся до сих пор в эксплуатации, могут быть заменены по желанию потребителя на современные полупроводниковые статические системы с любым набором заданных функций.

Высокий уровень интеграции современных микропроцессоров, большой объем памяти, высокое быстродействие, развитая периферия позволяют объединять в одном процессоре: функции автоматического регулирования напряжения, регулятора тока ротора (ручное управление), управления тиристорным преобразователем, ограничителей минимального и максимального токов возбуждения, ограничителя перегрузки с времязависимой характеристикой и т.д.

Таким образом, компания АО «Силовые Машины» проектирует, поддерживает и модернизирует электромашинные системы возбуждения генераторов путем их замены на тиристорные системы с независимым возбуждением, а также на статические системы с микропроцессорным контролем и управлением.

Список литературы

1. Силовые машины. Системы возбуждения. URL: 2019_Systemi_vozbuzhdenia_rus.pdf (power-m.ru) (Дата обращения 02.04.2021).
2. Электрическая часть станций и подстанций / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова, М.Н. Околович. М.: Энергоатомиздат, 1990. 551 с. Привалов Е.Е. Диагностика асинхронных двигателей электроэнергетического оборудования. Москва, 2015. 70 с.
3. SIPOLE Transistorized Excitation Systems for Synchronous Generators / Siemens AG Power Generation, 2004.
4. Boldea I., Synchronous Generators / Boca Raton: CRC Press, 2005. - 448 p.
5. ГОСТ 21558-2000. Межгосударственный стандарт. Системы возбуждения турбогенераторов, гидрогенераторов и синхронных компенсаторов. Дата введения 2003-07-01.
6. URL:http://catalog.gaw.ru/index.php?page=component_detail&id=64316 (Дата обращения 02.04.2021).

References

1. Silovyye mashiny. Sistemy vozbuzhdeniya. URL:

2019_Systemi_vozbuzhdenia_rus.pdf (power-m.ru) (Data obrashcheniya 02.04.2021).

2. Electric part of stations and substations / A. A. Vasiliev, I. P. Kryuchkov, E. F. Nayashkova, M. N. Okolovich. M.: Energoatom-izdat, 1990. 551 p. Privalov E. E. Diagnostics of asynchronous motors of electric power equipment. Moscow, 2015. 70 p.
3. SIPOLE Transistorized Excitation Systems for Synchronous Generators / Siemens AG Power Generation, 2004.
4. Boldea I., Synchronous Generators / Boca Raton: CRC Press, 2005. - 448 p.
5. GOST 21558-2000. Interstate standard. Excitation systems for turbogenerators, hydrogenerators, and synchronous compensators. Date of introduction 2003-07-01.
6. URL:http://catalog.gaw.ru/index.php?page=component_detail&id=64316 (Data obrashcheniya 02.04.2021).

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

УДК 539.621

Определение коэффициента трения скольжения методом гармонических колебаний

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», ул. 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 14.04.2021. г.; после доработки 16.04.2021 г.

Аннотация

В данной статье экспериментально исследуется сила трения скольжения между парами бронза – бронза, сталь – чугун. Рассмотрена история развития знаний о трении. Проанализированы существующие методы определения силы трения скольжения. Описана методика измерения коэффициента трения скольжения для различных материалов на установке типа ТММ-34 и на установке определения коэффициента трения скольжения методом наклонной плоскости. В соответствии с вышеописанными методиками приведена статистическая обработка данных, результаты которых сведены в таблицы. Полученные экспериментальные данные сравниваются с теоретическими.

Ключевые слова: трение, коэффициент трения скольжения, гармонические колебания, законы Ньютона.

Determination of the sliding friction coefficient by the harmonic oscillation method

Korneeva, N.K.¹, Pichugova, L.N.², Glushkova E.V.³, Dyudyaev I.A.⁴,
Mayorova V.V.⁵

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, , korneeva_nk@mail.ru, ,
kebpf2015@mail.ru, , glusev@mail.ru,
ntv5.5@mail.ru, vmaiorova0801@outlook.com.

Received 14.04.2021 y.; received in final form 16.04.2021 y.

Abstract

In this article, the sliding friction force between bronze – bronze and steel – cast iron pairs is experimentally investigated. The history of the development of knowledge about friction is considered. The existing methods for determining the sliding friction force are analyzed. The method of measuring the sliding friction coefficient for various materials on the TMM-34 type installation and on the installation for determining the sliding friction coefficient by the inclined plane method is described. In accordance with the methods described above, statistical data processing is provided, the results of which are summarized in tables. The experimental data obtained are compared with the theoretical data.

Keywords: friction, sliding friction coefficient, harmonic oscillations, Newton's laws.

Введение

Трение – один из видов взаимодействия тел.

Оно возникает при соприкосновении двух тел.

Силами сухого трения называют силы, возникающие при соприкосновении двух твердых

тел при отсутствии между ними жидкой или газообразной прослойки.

Сухое трение, в свою очередь, подразделяется на трение скольжения и трение качения.

При движении твердого тела в жидкости или газе возникает сила вязкого трения. Сила вязкого трения значительно меньше силы сухого трения.

Сила трения, возникающая при скольжении тела по шероховатой поверхности, называется силой трения скольжения при движении

Сила трения скольжения при движении направлена противоположно относительной скорости тела и пропорциональна нормальному давлению его на опорную поверхность или нормальной реакции опоры [3].

$$F_{mp} = fN,$$

где f - коэффициент трения скольжения при движении, или динамический коэффициент трения.

Этот коэффициент зависит от материала и состояния трущихся поверхностей, а также от относительной скорости тел.

В большинстве случаев с увеличением скорости динамический коэффициент трения покоя убывает, стремясь к некоторому пределу.

Коэффициент трения достигает своего наибольшего значения в состоянии покоя.

Углом трения φ называется наибольший угол между полной реакцией шероховатой поверхности и нормалью к ней.

Из рисунка 1 очевидно, что

$$\operatorname{tg}(\varphi) = f.$$

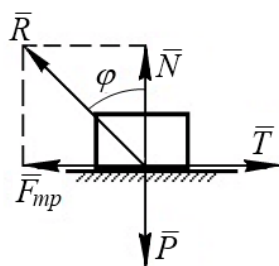


Рис. 1. Силы, действующие на тело на горизонтальной плоскости.

Существуют следующие методы определения коэффициента трения скольжения:

- движение тела по горизонтальной поверхности;
- наклонной плоскости;
- предложенный В.А. Желиговским (метод

рейсшины);

- гармонических колебаний.

Описание эксперимента

Метод «движение тела по горизонтальной поверхности». Рассмотрим метод определения коэффициента трения скольжения на примере тела A массой m , который движется с постоянной скоростью под действием силы F по горизонтальной поверхности тела B (рис. 2). В том случае, когда тело A скользит по поверхности тела B , между ними образовывается сила трения скольжения $F_{ск.тр.} = fN$, где N является силой нормальной реакции поверхности. Данные две силы формируют векторный треугольник, из которого имеем $\operatorname{tg} \varphi = \frac{F_{ск.тр.}}{N} = f$.

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{F_{ск.тр.}}{N} = f.$$

Итак, для определения коэффициента трения скольжения, нужно найти тангенс угла между векторами $F_{ск.тр.}$ силы трения скольжения и силой N нормальной реакции поверхности (в том случае, когда происходит равномерное прямолинейное движение тела A по поверхности тела B).

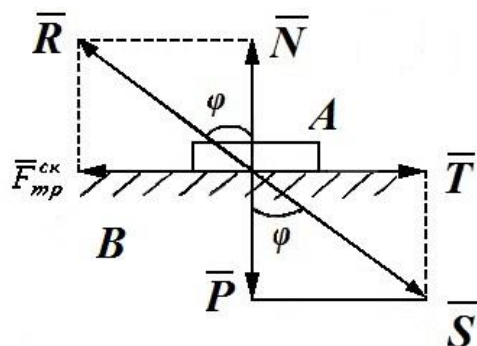


Рис. 2. Силы, действующие на тело на горизонтальной плоскости.

Метод «наклонной плоскости». Для определения коэффициента силы трения скольжения f положим тело A на наклонную поверхность B , угол наклона которой к горизонту можно менять (рис. 3). Зафиксируем угол наклона плоскости к горизонту α в этот момент, когда тело A начинает скользить по наклонной плоскости или двигаться по ней с постоянной скоростью. На рис. 3 изображены силы, действующие на тело A . Тело начинает скользить по наклонной плоскости,

значит в предельном случае $F_{mp} = P \cdot \sin(\alpha)$.

Согласно второму закону Ньютона

$$w = \frac{P \sin(\alpha) - F_{mp}}{m}.$$

Если учесть, что

$$F_{mp} = fP \cos(\alpha),$$

где f - коэффициент трения скольжения, то

$$w = g(\sin(\alpha) - f \cos(\alpha)).$$

Отсюда следует, что

$$f = \tan(\alpha) - \frac{w}{g \cos(\alpha)}.$$

Таким образом, коэффициент трения прямо пропорционален тангенсу угла α наклонной плоскости, при котором тело A начинает скользить по наклонной плоскости.

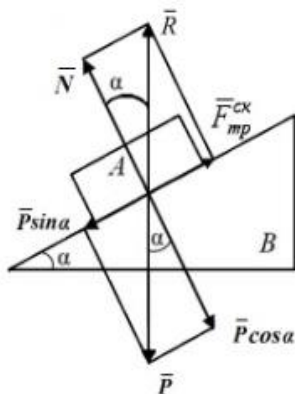


Рис. 3. Силы действующие на тело на наклонной плоскости.

Метод, предложенный В.А. Желиговским (метод рейсшины).

Суть данного метода заключается в следующем: линейка (рейсшина), поставленная на ребро может перемещаться поступательно по горизонтальной поверхности.

Линейка может перемещаться вправо по направляющей. Приложив тело к плоскости линейки так, чтобы соприкасались поверхности линейки и тела, определяется коэффициент трения скольжения [6].

Рассмотрим более подробно экспериментальное определение коэффициента трения методом гармонических колебаний.

Пусть прямоугольный брус весом Q установлен горизонтально на два цилиндрических диска, которые вращающихся с угловой скоро-

стью ω в противоположных направлениях относительно неподвижных горизонтальных осей (рис.4).

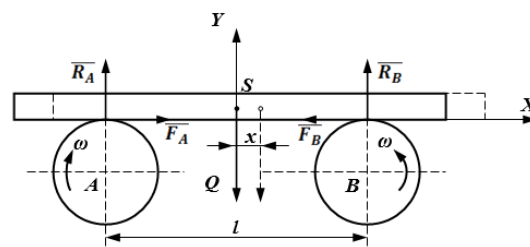


Рис. 4. Силы, действующие на тело двумя цилиндрическими дисками.

При симметричном расположении бруса относительно дисков А и В его центр масс S лежит на оси симметрии Y . Реакции R_A и R_B на брус со стороны дисков равны между собой

$$R_A = R_B = \frac{Q}{2}.$$

Силы трения, прикладываемые в точках касания, направлены навстречу друг другу по оси X .

$$F_A = fR_A.$$

$$F_B = fR_B.$$

Материалы, из которых выполнены дорожки дисков одинаковы, коэффициенты трения равны между собой. Соответственно равны между собой силы трения. Таким образом, брус уравновешен и находится в состоянии покоя.

Центр масс бруса S сместим относительно оси Y на величину x (показано пунктиром). С помощью уравнений статики определим реакции опор R_A и R_B .

$$\sum Y_k = 0,$$

$$R_A + R_B - Q = 0,$$

$$\sum m_A(F_k) = 0,$$

$$R_B l - Q\left(\frac{l}{2} + x\right) = 0,$$

Откуда

$$R_B = \frac{Q\left(\frac{l}{2} + x\right)}{l} = \frac{Q(l + 2x)}{2l},$$

$$R_A = Q - \frac{Q\left(\frac{l}{2} + x\right)}{l} = \frac{Q(l - 2x)}{2l},$$

Силы трения соответственно будут равны

$$F_A = fR_A = f \frac{Q(l-2x)}{2l},$$

$$F_B = fR_B = f \frac{Q(l+2x)}{2l}.$$

Равнодействующая сила трения приводит брус в движение и равна разности сил F_A и F_B .

Дифференциальное уравнение движения механической системы проектируем на ось ОХ:

$$m\ddot{x} = F_A - F_B.$$

Подставим значения сил трения:

$$m\ddot{x} = f \frac{Q(l-2x)}{2l} - f \frac{Q(l+2x)}{2l},$$

$$m\ddot{x} + \frac{2fQx}{l} = 0,$$

$$k^2 = \frac{2fQx}{ml}.$$

Получаем дифференциальное уравнение, которое в стандартной форме имеет вид

$$\ddot{x} + k^2x = 0.$$

Общее решение данного дифференциального уравнения имеет вид:

$$x = A \sin(kt + \alpha),$$

$$\dot{x} = Ak \cos(kt + \alpha).$$

Брус совершает гармонические колебания.

Период свободных колебаний груза определяется формулой:

$$T = \frac{2\pi}{k}.$$

Подставим значение k и получаем:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{ml}{2fQ}},$$

где

$$Q = mg,$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{2fg}}.$$

Из последней формулы определяем коэффициент трения:

$$f = \frac{2\pi^2 l}{T^2 g},$$

$$c = \frac{2\pi^2 l}{g}$$

- величина постоянная.

Окончательно получаем:

$$f = \frac{c}{T^2}.$$

Определение погрешностей.

Величины g, l постоянные, будем считать, что они даны с требуемой точностью.

Относительная ошибка коэффициента трения

$$\delta_f = \frac{\Delta f}{f} = \frac{2\Delta T}{T}.$$

Абсолютная ошибка

$$\Delta f = \delta_f \cdot f.$$

Абсолютная величина периода колебаний

T определяется как среднеарифметическое трех измерений, ΔT - среднеквадратичная ошибка этих измерений.

Исследование коэффициента трения скольжения пары материалов методом гармонических колебаний производится на установке типа ТММ-34 (рис. 5).

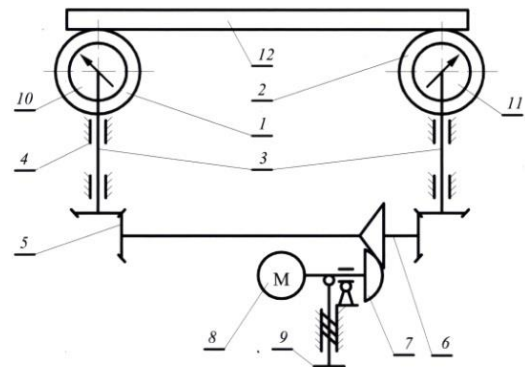


Рис. 5. Схема экспериментальной установки 1.

Диски установлены на шарикоподшипниках. Привод к дискам осуществляется от электродвигателя через фрикционно-грибковый вариатор, передающий вращение на распределительный вал и далее через коническую передачу на валы и цилиндры. Диски вращаются в различных направлениях. Каждый диск имеет по 3 дорожки из различных материалов (сталь, чугун, бронза).

Образец устанавливают на диски. Он имеет форму четырехгранного бруса, где грани выполнены из стали чугуна, бронзы и текстолита.

Таким образом, на приборе можно определить 12 комбинаций пар материалов. С помощью рукоятки грибкового вариатора передаточное отношение от электродвигателя к дискам можно изменять бесступенчато в 5 раз. Это дает возможность определять коэффициент трения при

различных окружных скоростях дисков.

Для определения скорости вращения дисков прибор снабжен тахометром типа ТМ-2 и стробоскопическим тахометром. Стробоскопический тахометр состоит из стробоскопического диска 10, укрепленного на торцевой части диска, миниатюрных лампочек, расположенных по окружности диска и цилиндрического кожуха, закрывающего лампочки и диск от дневного освещения.

Стробоскопический диск с помощью концентрических окружностей разделен на 8 кольцевых полос, которые в свою очередь разделены черными клетками на разное число частей. Внешняя кольцевая полоса - на 40, внутренняя на 8. Промежуточные кольца разделены, соответственно на 30, 24, 20, 15, 10 частей.

Питание лампочек производится от сети переменного тока с частотой 50 Гц, вследствие чего, они дают 100 вспышек в секунду (через каждую 0,01 секунду вспышка).

Если останавливается самое большое кольцо, разделенное на 40 частей, то диски делают 2,5 оборота (150 об/мин).

При 200 об/мин будет казаться, что остановилась кольцевая полоса с 30 делениями и т.д. В корпус прибора вмонтирован секундомер, с помощью которого определяется период колебаний бруса.

Приведение установки в горизонтальное положение производится винтами 13, пуск двигателя осуществляется тумблером 12 с последующим нажатием пусковой кнопки.

Основные параметры прибора:

1. Диаметр шкивов 170 мм
2. Расстояние между центрами дисков 550 мм
3. Приводной электродвигатель:
 - мощность 0,180 кВт
 - напряжение 127/220 В
 - число оборотов 1420 об/мин
4. Передаточное отношение от двигателя к диску бесступенчатое от 9,5 до 1,9
5. Окружная скорость дисков от 1,5 до 12,5 м/сек
6. Вес установки 65 кг
7. Габариты 800x380x350

Результаты эксперимента при изменении угловой скорости установки занесены в таблицы 1, 2, 3, 4.

Исследование коэффициента трения скольжения пары материалов методом «наклонной плоскости» происходит с помощью установки, в которую входят: наклонная плоскость с регулируемой высотой, секундомер, набор тел.

Общий вид установки представлен на рис.6.

Наклонная плоскость представляет собой

доску 1, угол наклона которой можно варьировать, изменяя высоту плоскости с помощью кронштейна 2. На вершине плоскости укреплен электромагнит 3, удерживающий тело.

Измерение времени скольжения или скатывания проводится с помощью миллисекундомера 4. Включение секундомера с помощью переключателя 6 размыкает цепь электромагнита и тело начинает двигаться вниз по наклонной плоскости.

При ударе скатывающегося тела о специальную пластинку 5, расположенную вертикально у основания наклонной плоскости, происходит выключение секундомера.

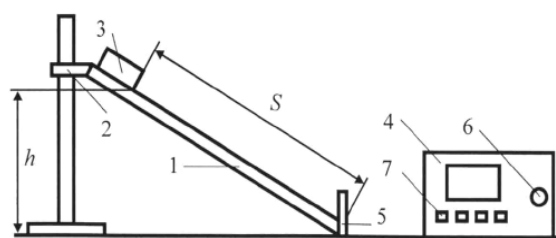


Рис. 6. Схема экспериментальной установки 2.

Результаты эксперимента установки занесены в таблицы 5,6.

Метод гармонических колебаний:

Таблица 1. Результаты эксперимента 1.1 (бронза – бронза, $\omega = 650$ об/с).

t1 = 23,2	f1 = 0,210	$\Delta f1 = 0$
t2 = 22,8	f2 = 0,210	$\Delta f2 = 0$
t3 = 22,8	f3 = 0,210	$\Delta f3 = 0$
tcp = 22,9	fcp = 0,210	$\Delta fcp = 0$

Таблица 2. Результаты эксперимента 1.2 (бронза – бронза, $\omega = 700$ об/с).

t1 = 23,0	f1 = 0,210	$\Delta f1 = 0$
t2 = 23,0	f2 = 0,210	$\Delta f2 = 0$
t3 = 22,8	f3 = 0,210	$\Delta f3 = 0$
tcp = 22,9	fcp = 0,210	$\Delta fcp = 0$

Таблица 3. Результаты эксперимента 2.1 (сталь – чугун, $\omega = 580$ об/с).

t1 = 22,6	f1 = 0,200	$\Delta f1 = 0$
t2 = 22,8	f2 = 0,201	$\Delta f2 = 0,001$
t3 = 23,2	f3 = 0,200	$\Delta f3 = 0$
tcp = 22,9	fcp = 0,200	$\Delta fcp = 0$

Таблица 4. Результаты эксперимента 2.2 (сталь – чугун, $\omega = 650$ об/с).

t1 = 23,2	f1 = 0,201	$\Delta f1 = 0,001$
t2 = 22,8	f2 = 0,203	$\Delta f2 = 0,003$
t3 = 22,8	f3 = 0,200	$\Delta f3 = 0$
tcp = 22,9	fcp = 0,201	$\Delta fcp = 0,002$

Метод «наклонной плоскости»:

Таблица 5. Результаты эксперимента 3 (бронза – бронза).

$t_1 = 7,8$	$f_1 = 0,201$	$\Delta f_1 = 0,01$
$t_2 = 7,6$	$f_2 = 0,198$	$\Delta f_2 = 0,01$
$t_3 = 8,0$	$f_3 = 0,207$	$\Delta f_3 = 0,003$
$t_{cp} = 7,8$	$f_{cp} = 0,202$	$\Delta f_{cp} = 0,008$

Таблица 6. Результаты эксперимента 4 (сталь – чугун).

$t_1 = 8,0$	$f_1 = 0,207$	$\Delta f_1 = 0,01$
$t_2 = 7,8$	$f_2 = 0,201$	$\Delta f_2 = 0,001$
$t_3 = 7,9$	$f_3 = 0,204$	$\Delta f_3 = 0,004$
$t_{cp} = 7,9$	$f_{cp} = 0,204$	$\Delta f_{cp} = 0,005$

Заключение

По итогам экспериментов полученные результаты коэффициентов трения скольжения методом гармонических колебаний и методом «наклонной плоскости» с теоретическими значениями сведены в таблицы 7 и 8.

Таблица 7. Средние значения результатов экспериментов для материала бронза-бронза.

$f_{теор.}$	$f_{колеб.}$	$f_{наклон.}$
0,210	0,210	$0,202 \pm 0,008$

Таблица 8. Средние значения результатов экспериментов для материала сталь – чугун.

$f_{теор.}$	$f_{колеб.}$	$f_{наклон.}$
0,200	$0,201 \pm 0,002$	$0,204 \pm 0,005$

Таким образом, экспериментальные значения, определенные методом гармонических колебаний и «наклонной плоскости» абсолютно удовлетворяют теоретическим, что подтверждает их целесообразность применения. Однако, как мы можем наблюдать, метод гармонических колебаний является достоверным и более точным.

Список литературы

1. Блехман И.И., Джанелидзе Г.И. Вибрационное перемещение. М.: Наука, 1964. 313 с.
2. Волосов В.М., Моргунов Б.И. Метод осреднения в теории нелинейных колебательных систем. М.: Изд-во МГУ, 1971. 507 с.
3. Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С. Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления. М.: Наука, 1986. 615 с.
5. Armstrong-Helouvry B., Dupont P., Canudas de Wit C. A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for Control of Machines with

Friction // Automatika. 1994. Vol. 30, № 7. P. 1083-1138.

6. Canudas de Wit C., Olsson H., Astrom K.J., Lishinsky P. A New Model for Control of Systems with Friction // IEEE Trans. AC-40. 1995. № 3. P. 419-425.
7. Pervozvanski A., Canudas de Wit C. Vibrational Smoothing in Systems with Dynamic Friction // Subm. to Trans. ASME. 1998.
8. Scherge Matthias, Biological micro- and nanotribology: Nature's solutions. Springer, 2001

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., Komalov V. S. Fundamentals of calculations for friction and wear. Moscow: Mashinostroenie, 1977. 526 p.
4. Pervozvansky A. A. Course of the theory of automatic control. Moscow: Nauka, 1986. 615 p.
5. Armstrong-Helouvry B., Dupont P., Canudas de Wit C. A Survey of Models, Analysis Tools and Compensation Methods for Control of Machines with Friction // Automatika. 1994. Vol. 30, № 7. P. 1083-1138.
6. Canudas de Wit C., Olsson H., Astrom K.J., Lishinsky P. A New Model for Control of Systems with Friction // IEEE Trans. AC-40. 1995. № 3. P. 419-425.
7. Pervozvanski A., Canudas de Wit C. Vibrational Smoothing in Systems with Dynamic Friction // Subm. to Trans. ASME. 1998.
8. Scherge Matthias, Biological micro- and nanotribology: Nature's solutions. Springer, 2001

УДК 004.422.81; ББК 30.2-5-05

Автоматизация выбора мер по обеспечению безопасности объекта КИИ соответствующей категории значимости при составлении модели угроз

М.И. Ожиганова¹, А.О.Егорова¹, А.О. Миронова², А.А. Головин¹

¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, m.i.ozhiganova@sevsu.ru
²ФГБОУ ВО Ростовский государственный экономический университет (РИНХ)
Б. Садовая, 69, г. Ростов-на-Дону, 344002, Россия e-mail: iph7red911@gmail.com

Статья поступила 26.04.2021 г.; после доработки 28.04.2021 г.

Аннотация

В данной статье представлена программа для автоматизации выбора мер по обеспечению безопасности объекта КИИ соответствующей категории значимости Российской Федерации. В качестве среды разработки для данного программного продукта была использована разработанная компанией JetBrains на основе IntelliJ IDEA PyCharm для языка программирования Python. Работу программы обеспечивают библиотеки PyQt5, python-docx-template's, pyinstaller, openpyxl. В итоге работы программы объекту критической информационной инфраструктуры присваивается категория итоговой значимости, на основе чего формируется состав мер по обеспечению безопасности объекта КИИ соответствующей категории значимости.

Ключевые слова: критическая информационная инфраструктура (КИИ), категорирование, автоматизация, значимый объект, состав мер по обеспечению безопасности значимого объекта.

Automation of the selection of measures to ensure the safety of the CII facility of the significance category in modeling the threat

M.I. Ozhiganova¹, A.O. Egorova², A.O. Mironova³, A.A. Golovin⁴

^{1,2}Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, m.i.ozhiganova@sevsu.ru

³Rostov State Economic University (RINH), 69 B. Sadovaya st, 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

В Федеральном законе от 26.07.2017 №

187-ФЗ «О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации» содержится определение понятия «Критическая информационная инфраструктура» — это

совокупность автоматизированных систем управления КВО и обеспечивающих их взаимодействие информационно-телекоммуникационных сетей, предназначенных для решения задач государственного управления, обеспечения обороноспособности, безопасности и правопорядка, нарушение (или прекращение) функционирования которых может стать причиной наступления тяжких последствий.

Практическая значимость работы состоит в том, что она даёт возможность использовать полученные результаты для автоматизации процесса выбора определенных мер защиты объектов КИИ соответствующей категории значимости.

Постановка задачи

В данной статье необходимо обосновать положение о том, что для наиболее эффективной защиты объекта критической информационной инфраструктуры необходимы определенные варианты защиты для каждой категории значимости. Так же описано функционирование разработанного программного модуля для автоматизации выбора мер по обеспечению безопасности объекта критической информационной инфраструктуры соответствующей категории значимости с учетом основных положений нормативных документов по защите критической информационной инфраструктуры в государственном масштабе.

Анализ состава мер по обеспечению безопасности значимого объекта соответствующей категории значимости

Пользователи информационной системы значимого объекта обязаны однозначно идентифицироваться и аутентифицироваться для всех видов доступа в соответствии с законодательством Российской Федерации. В информационной системе для управления доступом субъектов доступа к объектам доступа должны быть реализованы методы управления доступом, которые установлены оператором, назначены типы доступа субъектов к объектам доступа и реализованы правила разграничения доступа субъектов доступа к объектам доступа. В информационной системе значимого объекта должна обеспечиваться установка только разрешенного к использованию в информационной системе программного обеспечения и его компонентов с учетом перечня программного обеспечения и его

компонентов, разрешенных оператором к установке («белый список»), и перечнем программного обеспечения и его компонентов, запрещенных оператором к установке («черный список»).

В информационной системе значимого объекта должны быть реализованы оператором:

- контроль целостности средств защиты информации, осуществляемые по контрольным суммам всех компонентов средств защиты информации как в процессе загрузки, так и динамически в процессе работы систем;
- установка только разрешенного к использованию программного обеспечения и его компонентов;
- методы управления доступом, назначены типы доступа субъектов к объектам доступа и реализованы правила разграничения доступа;
- обеспечение контролируемой зоны, где постоянно размещаются стационарные технические средства;
- инвентаризация информационных ресурсов;
- установка антивирусной защиты для обнаружения несанкционированного вторжения.

Для обеспечения реагирования на компьютерные инциденты и внештатные ситуации служит государственная система — единый территориально-распределенный комплекс, включающий силы и средства, предназначенные для обнаружения, предупреждения и ликвидации последствий компьютерных атак.

Автоматизации выбора мер по обеспечению безопасности объекта КИИ

Программа для автоматизации выбора мер по обеспечению безопасности объекта Критической информационной инфраструктуры соответствующей категории значимости располагается на четырех окнах, обеспечивающих последовательную, логически выверенную работу.

На первом окне (в соответствии с рисунком 1) данная программа предоставляет доступ к основным документам по категорированию и возможность автоматизированного ввода данных в область сферы деятельности объекта, типа объекта, архитектуры объекта.

Затем на втором окне (в соответствии с рисунком 2) осуществляется возможность автоматизированного выбора показателей из «Перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры

Российской Федерации и их значения», Утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 8 февраля 2018 г. N 127.

Автоматизация выбора мер

Наименование объекта:
информационно-вычислительная сеть ООО «Фортуна»

Адреса размещения объекта:
Республика Крым г. Севастополь улица Ивушкина, дом 3

Сфера (область) деятельности:
Топливо-энергетический комплекс

Назначение объекта:
осуществление взаимодействия зсм

Тип объекта:
Информационно-телекоммуникационная сеть

Архитектура объекта:
Клиент-серверная система

ПР РФ N 127 ФЗ N 187

OK Cancel

Рис. 1. Предоставление программой доступа к основным документам

Сформировать список мер

1) Причинение ущерба жизни и здоровью людей (человек) не выбрано

2) Прекращение <1> или нарушение функционирования <2> объектов обеспечения жизнедеятельности населения <3>, оцениваемые:

а) на территории, на которой возможно нарушение обеспечения жизнедеятельности населения: не выбрано

б) по количеству людей, условия жизнедеятельности которых могут быть нарушены (тыс. человек) не выбрано

3) Прекращение <1> или нарушение функционирования <2> объектов транспортной инфраструктуры, оцениваемые:

а) Прекращение <1> или нарушение функционирования <2> объектов транспортной инфраструктуры, оцениваемые:

б) по количеству людей, для которых могут быть недоступны транспортные услуги (тыс. человек) не выбрано

4) Прекращение <1> или нарушение функционирования <2> сети связи, оцениваемые по количеству абонентов, для которых могут быть недоступны услуги связи (тыс. человек) не выбрано

5) Отсутствие доступа к государственной услуге, оцениваемое в максимальном допустимом времени, в течение которого государственная услуга может быть недоступна для получателей такой услуги (часов) не выбрано

<1> Полное прекращение выполнения критического процесса.

<2> Отклонение значений параметров критического процесса, в том числе временных параметров и параметров надежности, от проектных (штатных) режимов функционирования.

<<< Back Завершить процесс категорирования

Рис. 2. Автоматизированный выбор показателей из «Перечня показателей критериев значимости объектов КИИ Российской Федерации и их значения»

Третье окно с названием, которое меняется в зависимости от присвоенной категории (в соответствии с рисунком 3), осуществляет автоматизацию процесса присвоения категории каждой значимости для конкретизации категорирования

и выдачи категории итоговой значимости объекта. У оператора (как и на предыдущих окнах) есть возможность кнопкой «Back» вернуться к предыдущим этапам категорирования для редактирования их, кнопкой «Cancel» завершить процесс категорирования, а кнопкой «Сохранить отчёт по категорированию» экспортировать итоговые данные в документ Microsoft Word (.docx). Итоговый документ Microsoft Word (.docx) представляет собой форму, утвержденную приказом ФСТЭК России от 22 декабря 2017 г. № 236 (в ред. Приказа ФСТЭК России от 21.03.2019 № 59) «Сведения о результатах присвоения объекту критической информационной инфраструктуры одной из категорий значимости либо об отсутствии необходимости присвоения ему одной из таких категорий».

Присвоена 2 категория значимости

Наименование объекта	информационно-вычислительная сеть ООО «Фортуна»
Адреса размещения объекта	Республика Крым г. Севастополь улица Ивушкина, дом 3
Сфера (область) деятельности	Топливо-энергетический комплекс
Назначение объекта	осуществление взаимодействия зсм
Тип объекта	Информационно-телекоммуникационная сеть
Архитектура объекта	Клиент-серверная система
Категория значимости, которая присвоена объекту	2 категория
Социальная значимость	2 категория
Политическая значимость	3 категория
Экономическая значимость	3 категория
Экологическая значимость	3 категория
Значимость для обеспечения обороны страны	3 категория

<<< Back Сохранить отчёт по категорированию Сформировать список мер Cancel

Рис. 3. Автоматизация процесса присвоения категории каждой значимости

Четвертое окно (в соответствии с рисунком 4) открывается при помощи кнопки «Сформировать список мер». На данном окне на странице 1 расположен состав мер по обеспечению безопасности для значимого объекта соответствующей категории значимости, утвержденный приказом ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. N 239 «Об утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации».

на странице 2 (в соответствии с рисунком 5) для более подробного ознакомления с требованиями к созданию систем безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры РФ и обеспечения их функционирования можно ознакомиться со следующими документами:

приказ фстэк россии от 25 декабря 2017 г. n 239;

приказ фстэк россии от 21 декабря 2017 г. n 235.

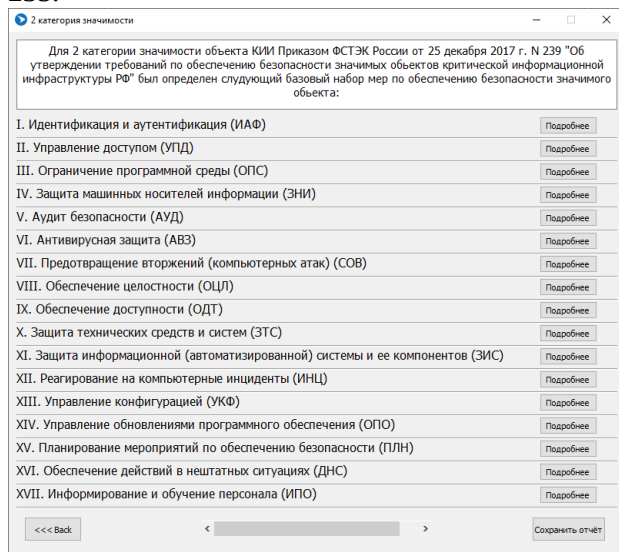


Рис. 4. Состав мер по обеспечению безопасности объекта КИИ

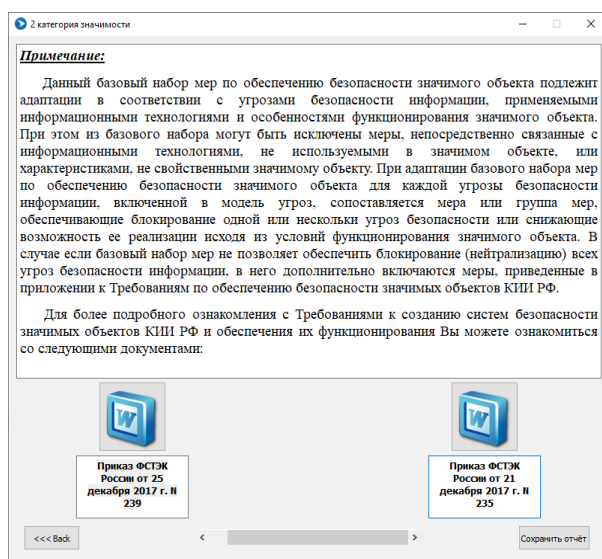


Рис. 5. Требования к созданию систем безопасности значимых объектов КИИ и обеспечения их функционирования

На странице 1 (окно 4) реализована возможность получения подробной информации состава любой выбранной меры, для чего нужно нажать на кнопку «подробнее» напротив необходимой меры. после нажатия кнопки открывается диалоговое окно с названием выбранной меры. на первой странице данного окна — содержание нужной меры, которое изменяется в зависимости

от присвоенной категории значимости. для демонстрации выбрана мера «ii. управление доступом (упд)» (в соответствии с рисунком 6)

На странице 2 диалогового окна (в соответствии с рисунком 7) можно получить дополнительную информацию по выбранной мере в виде примечания. Нажатием кнопки «Ок» диалоговое окно с выбранной мерой закрывается, что даёт возможность открыть содержание другой меры.

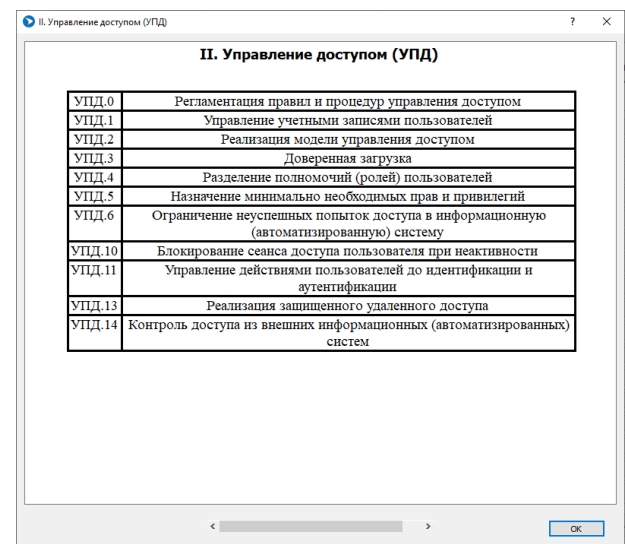


Рис. 6. Содержание выбранной меры, которое изменяется в зависимости от присвоенной категории значимости

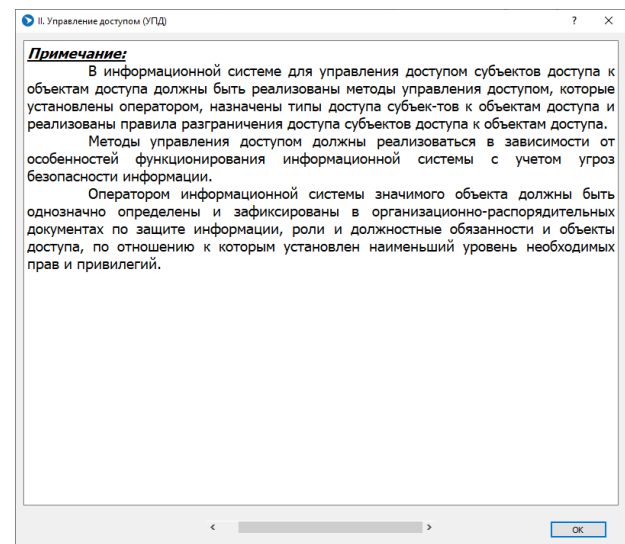


Рис. 7. Дополнительная информация по выбранной мере в виде примечания

На странице 1 (окно 4) расположена кнопка «сохранить отчёт», нажатием которой формируется

отчёт с составом мер по обеспечению безопасности объекта критической информационной инфраструктуры соответствующей категории значимости, что и реализует автоматизацию выбора мер по обеспечению безопасности объекта критической информационной инфраструктуры соответствующей категории значимости. Эти данные экспортируются в документ microsoft word (.docx). созданный программный модуль для автоматизации выбора мер по обеспечению безопасности значимого объекта критической информационной инфраструктуры соответствующей категории значимости, позволяющий ускорить, облегчить и упростить:

- этап присвоения категории объекту критической информационной инфраструктуры;
- процесс выбора мер по обеспечению безопасности значимого объекта критической информационной инфраструктуры;
- формирование итогового акта по категорированию;
- сохранение отчета с составом выбранных мер, исходя из присвоенной категории значимости.
- программный модуль создан на основе языка программирования python с использованием модуля ruqt5 для создания интерфейса, который позволяет легко взаимодействовать с программой.

Преимуществами созданной программы являются:

- возможность в любой момент получить доступ к основным государственным документам по категорированию;
- расположение каждой значимости на отдельной странице, что значительно упрощает выбор показателей значимости;
- возможность возвратиться на любой этап программы для корректировки работы;
- возможность воспользоваться при необходимости всплывающей подсказкой при выборе показателей;
- формирование списка мер в зависимости от присвоенной категории значимости;
- наличие детальных примечаний к каждой выбранной мере;
- формирование итогового акта по утвержденной форме.

Заключение

Написанный алгоритм гарантирует четкую, логически выверенную работу программного

модуля, который может быть использован субъектами критической информационной инфраструктуры для автоматизации выбора мер по обеспечению безопасности объекта критической информационной инфраструктуры в зависимости от присвоенной категории значимости. на основе анализа мер защиты из приказа ФСТЭК России от 25 декабря 2017 г. № 239 и Постановления правительства РФ от 08.02.2018 № 127 (ред. от 13.04.2019), программа позволяет формировать список мер на основе присвоенной категории значимости и подробное описание в виде примечания к каждой мере, и даёт возможность сохранить результат в виде отчета.

Работа программного модуля для автоматизации выбора мер по обеспечению безопасности объекта критической информационной инфраструктуры соответствующей категории значимости обеспечивается библиотеками, которые отрисовывают программу при помощи виджетов, позволяют создать итоговые документы, формируют список мер и конвертируют программный продукт в исполняемый файл. данная программа располагается на четырёх окнах, обеспечивающих последовательную, логически выверенную работу, которая осуществляет процесс категорирования и автоматизацию выбора мер.

Список литературы

1. Федеральный закон от 26.07.2017 N 187-ФЗ "О безопасности критической информационной инфраструктуры Российской Федерации". [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ст.: <http://www.consultant.ru> / (дата обращения 12.05.2021 г.).
2. Постановление Правительства РФ от 08.02.2018 N 127 (ред. от 13.04.2019) "Об утверждении Правил категорирования объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации, а также перечня показателей критериев значимости объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации и их значений". [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ст.: <http://www.consultant.ru> / (дата обращения 12.05.2021 г.).
3. Приказ ФСТЭК России от 22.12.2017 N 236 (ред. от 21.03.2019) "Об утверждении формы направления сведений о результатах присвоения объекту критической информационной инфраструктуры одной из категорий значимости либо об отсутствии необходимости присвоения ему одной из таких категорий" (Зарегистрировано в Минюсте России 13.04.2018 N 50753) [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ст.: <http://www.consultant.ru> / (дата обращения 12.05.2021 г.).
4. Приказ ФСТЭК РФ от 12.12.2019 N 239 Об

утверждении Требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации (в ред. приказов ФСТЭК России от 9 августа 2018 г. № 138, от 26 марта 2019 г. № 60, от 20 февраля 2020 г. № 35). – Режим доступа к ст.: <http://www.consultant.ru> / (дата обращения 12.05.2021 г.).

5. PyQt5 Tutorial Documentation Release 1.0 //Andrew Steele. // March 01, 2016

References

1. Federal Law of July 26, 2017 N 187-FZ "On the security of the critical information infrastructure of the Russian Federation." [Electronic resource]. - Mode of access to the article: <http://www.consultant.ru> / (date of access 12.05.2021).
2. Decree of the Government of the Russian Federation of 08.02.2018 N 127 (as amended on 13.04.2019) "On approval of the approval of categorization of objects of critical information infrastructure of the Russian Federation, as well as a list of indicators of criteria for the significance of objects of critical information infrastructure of the Russian Federation and" their values ". [Electronic resource]. - Access mode to the article: <http://www.consultant.ru> / (date of treatment 05/12/2021).
3. Order of the FSTEC of Russia of December 22, 2017 N 236 (as amended of March 21, 2019) "On approval of the form for sending information about the results of assigning a critical information infrastructure to an object of one of the categories of significance or about the absence of the need to assign one of such categories to it. "(Registered in the Ministry of Justice of Russia on April 13, 2018 N 50753) [Electronic resource]. - Access mode to the station: <http://www.consultant.ru> / (date of access 12.05.2021).
4. Order of the FSTEC of the Russian Federation dated 12.12.2019 N 239 On approval of the Requirements for ensuring the safety of significant objects of critical information infrastructure of the Russian Federation (as amended by orders of the FSTEC of Russia dated August 9, 2018 No. 138, dated March 26, 2019 No. No. 60, dated February 20, 2020 No. 35). - Mode of access to the article: <http://www.consultant.ru> / (date of access 12.05.2021).
5. PyQt5 Tutorial Documentation Release 1.0 // Andrew Steele. // March 01, 2016

УДК 53.082.7

Контроль влажности угольных пород при помощи радиоволн

И.Б. Широков¹, П.А. Евдокимов², Е.И. Широкова³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, ¹shirokov@ieee.org, ²evdokimov@ieee.org, ³shirokova@ieee.org

Статья поступила 12.04.2021 г.; после доработки 14.04.2021 г.

Аннотация

Статья посвящена актуальной проблеме контроля влажности угольных пород на различных производственных стадиях. Проведен сравнительный анализ существующих контактных и бесконтактных методов, и приборов контроля влаги в угле. Определено, что недостатки существующих методов не позволяют организовать прецизионный контроль содержания влаги в больших объемах угольных пород с различной удельной электропроводимостью. Предложен новый радиоволновый метод определения влажности угольных пород, основанный на фазометрических измерениях и гомодинном преобразовании частоты. Информацию о содержании влаги в угле получают путем определения диэлектрической проницаемости контролируемой среды с учетом её температуры. Приведена структурная схема устройства для реализации метода и рассмотрены теоретические возможности его работы. Описана математическая модель для вычисления влажности угля, которая учитывает различные формы связи влаги в угле.

Ключевые слова: фазометрические измерения, диэлектрическая проницаемость, набег фазы, гомодинное преобразование, угольные породы, контроль влажности

Monitoring the moisture content of coal rocks using radio waves

I.B. Shirokov¹, P.A. Evdokimov², E.I. Shirokova³

Sevastopol State University, Universitetskaya st., 33 Sevastopol, 299053, Russia.

¹shirokov@ieee.org, ²evdokimov@ieee.org, ³shirokova@ieee.org

Received 12.04.2021 y.; received in final form 14.04.2021 y.

Abstract

The article is devoted to the actual problem of controlling the moisture content of coal rocks at various production stages. A comparative analysis of existing contact and non-contact methods and devices for controlling moisture in coal has been carried out. It was determined that the disadvantages of existing methods do not allow organizing precision control of moisture content in large volumes of coal rocks with different specific electrical conductivity. A new radio-wave method for determining the moisture content of coal rocks, based on phase measurements and homodyne frequency conversion, is proposed. Information on the moisture content in coal is obtained by determining the dielectric permittivity of the controlled environment, taking into account its temperature. The block diagram of the device for the implementation of the method is given and the theoretical possibilities of its operation are considered. A mathematical model for calculating the moisture content of coal is described, which takes into account various forms of moisture in coal.

Keywords: phase measurement, dielectric permittivity, phase progression, homodyne conversion, coal rocks, moisture control.

Введение

Уголь, являясь одним из основных видов ископаемого топлива, играет важную роль в развитии экономики и энергетики.

Согласно подсчётам, почти 42% мировой электроэнергии получают за счет сжигания угля [1]. Одной из наиболее важных характеристик угля, которая определяет его качество и существенно ценность, является влажность.

Содержание влаги в угольных породах приводит к дополнительным энергетическим потерям, которые вызваны испарением воды и нагревом пара. Также содержание в угле водного балласта удорожает стоимость его перевозки. Причем транспортировка влажного угля в условиях низких температур способствует его смерзаемости и, соответственно, частичной или полной потери сыпучести [2].

Кроме того, влажность отрицательно влияет на технологию переработки угля. Так, например, каждый процент влаги в угле увеличивает продолжительность коксования на 5-10 минут [3].

Таким образом, контроль влажности угольных пород на всех производственных стадиях является актуальной и важной задачей.

Методы и приборы определения влажности угольных пород

Уголь, содержащий влагу, представляет собой многокомпонентную систему, в которой вода, как один из компонентов может находиться в различных состояниях. При организации измерений влажности важно учитывать физико-химические свойства системы, которые определяются свойствами твердого тела, а также количеством и свойствами влаги [4].

Различные виды и формы связи влаги с углем оказывают разное влияние на свойства влагосодержащего материала и соответственно на процедуру измерения влажности угольных пород.

В соответствии с классификацией, основанной на величине энергии связи твердого тела и молекул воды [5], влагу в угле, как в капиллярно-пористом теле можно разделить на следующие виды и формы связи:

- свободная вода;
- влага капиллярно-связанная (влага физико-механической связи);
- влага адсорбционно-связанная (влага физико-химической связи).

Таким образом, влага в угольных породах может быть свободной и связанной.

Свободную влагу с поверхности угля можно удалить под воздействием силы тяжести, под воздействием центробежных сил в центрифугах, а также на установках по грохочению угля.

Связанная влага сильнее удерживается на поверхности угля, при этом прочность связи молекул воды определяется формой связи.

Более прочно удерживается адсорбционно-связанная влага, которая образуется под действием молекулярно-силового поля [6]. На

начальном этапе сорбции на поверхностях твердого тела создается мономолекулярный слой, наиболее прочно связанный с поверхностью угля. После чего собираются второй и последующие слои, которые связаны менее прочно из-за большего расстояния от твердой поверхности в соответствии с законом ван-дер-ваальсовых сил.

Влага физико-механической связи образуется в капиллярах в результате поглощения воды из влажного воздуха или непосредственного соприкосновения поверхности угля с водой. Причиной возникновения капиллярно-связанной влаги является капиллярное давление, обусловленное кривизной поверхности жидкости в капиллярах.

На сегодняшний день известно множество методов и приборов для определения влажности угля.

Самыми распространёнными методами являются массово-весовые методы определения влажности в твёрдом топливе. Методы массово-весового определения влаги в угле, следующие:

- метод определения влаги по потере массы, который регулируется национальным государственным стандартом [7];
- метод определения влаги ускоренным высушиванием, который регулируется межгосударственным стандартом [8].

Принципиальное отличие указанных массово-весовых методик определения влажности угля заключается в температуре и времени высушивания.

По методу, описанному в государственном стандарте [7], содержание влаги определяют по потере массы при высушивании пробы угля на воздухе или в токе азота. Причем высушивание на воздухе применимо к топливу, которое устойчиво к окислению при нагревании до температуры 105-110°C, а высушивание в токе азота применимо ко всем видам топлива.

При этом продолжительность основного периода сушки без ускорения составляет не менее 60 мин для каменных углей и горючих сланцев и 90 мин для бурых углей и антрацитов.

По ускоренному методу сушат при температуре $(160 \pm 5)^\circ\text{C}$ не менее:

- 30 мин — бурые угли;
- 15 мин — каменные угли, горючие сланцы;
- 20 мин — антрацит.

Бурые угли с массовой долей общей влаги более 35% сушат 60 мин.

Стоит отметить, что одним из главных процессов в определении влаги в углях при помощи массово-весовых методов является процедура от-

бора пробы, которая также регулируется государственным стандартом [9].

Массово-весовые методы получили широкое распространение и регулируются государственными стандартами.

Однако указанные методики обладают существенными недостатками, такими как длительность установления показаний и возможность только локального контроля влажности угля. Причем точность определения влаги по этим методам сильно зависит от правильности отбора проб, в частности, от количества и массы точечных проб, а также от исправности оборудования для отбора и подготовки проб.

В отличие от перечисленных способов радиоволновые методы позволяют проводить бесконтактный непрерывный контроль содержания влаги во всем объеме контролируемого угля. Существующие приборы основаны на амплитудных методиках измерения в микроволновом диапазоне.

Примером микроволнового влагомера может стать система автоматического контроля влажности угля с использованием влагомера типа «ИВА-1.1», производитель ОАО «ИОТТ», РФ (рис.1).

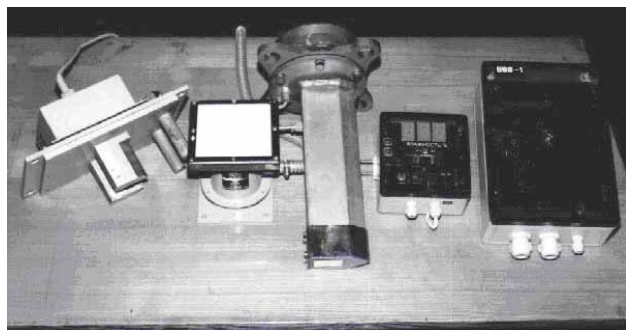


Рис. 1. Система автоматического контроля влажности угля непосредственно в технологическом потоке с использованием влагомера типа «ИВА-1.1».

Влагомер типа «ИВА-1.1» предназначен для непрерывного технологического контроля влажности угля и продуктов его обогащения (кроме антрацитов). Принцип его работы основан на измерении величины поглощения электромагнитной энергии СВЧ-диапазона слоем влажного угля [10].

Согласно техническим характеристикам влагомера, представленным на сайте производителя, устройство позволяет осуществлять контроль в диапазоне влажности:

- для каменного угля от 3 до 25%;
- для бурого угля от 5 до 55%.

При этом абсолютная погрешность контроля

влажности, не более:

- 0,7% (при влажности до 10%);
- 2,5% (при влажности выше 10%).

Более точным измерителем влаги в углях является конвейерный микроволновой влагомер КА-500 производства компании «КОНВЕЛС Автоматизация», РФ (рис.2).

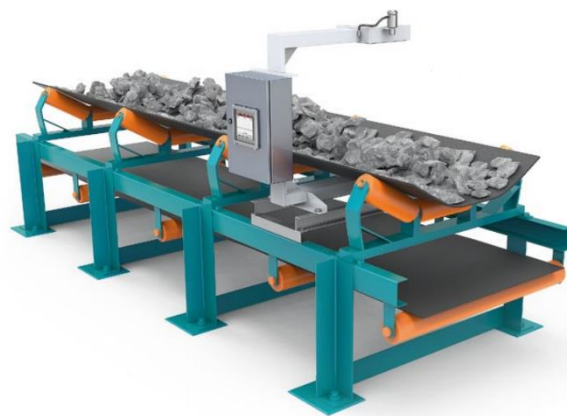


Рис. 2. Конвейерный влагомер сыпучих материалов КА 500.

Влагомер КА-500 предназначен для непрерывного бесконтактного измерения влажности сыпучих материалов на конвейерной ленте, трубопроводах, желобах. Микроволновая технология основана на аттенуации СВЧ излучения при прохождении через слой контролируемого материала [11].

Характеристики конвейерного микроволнового влагомера КА-500:

- рабочий диапазон влажности: от 0 до 90%;
- абсолютная погрешность контроля влажности: 0,5%;
- толщина слоя контролируемого материала: до 500 мм.

Данный влагомер позволяет получать показания влажности контролируемого материала в режиме реального времени. Контролируемые материалы: уголь, угольные концентраты, удобрения и известняки.

Также для бесконтактного контроля влажности сыпучих материалов, в том числе и угля, используют поточный микроволновый влагомер M-Sens 2 производства SWR engineering, Германия (рис.3).

Принцип измерения влажности, применяемый в M-Sens 2, основан на поглощении микроволнового излучения материалом. Чем больше влажность, тем больше энергии микроволновых колебаний поглощается и, соответственно тем меньше возвращается на

сенсор датчика влагомера, полученный сигнал обрабатывается в цифровом виде [12].



Рис. 3. Поточный микроволновый влагомер M-Sens 2.

Характеристики микроволнового влагомера M-Sens 2:

- измеряемый диапазон остаточной влажности у влагомера: от 0 до 65%.
- абсолютная погрешность измерений: 0,1%.

При этом возможные неточности измерений, вызванные неоднородностью материала, могут быть уменьшены за счет подключения к модулю обработки до 3-х сенсоров.

Рассмотренные микроволновые влагомеры позволяют осуществлять бесконтактный непрерывный контроля влажности угля с выводом показаний в режиме реального времени. Однако приборы, основанные на микроволновых амплитудных методах, ограничены в возможностях применения на электропроводящих материалах, и на это указывают сами производители [10-11]. Для углей с малым удельным электрическим сопротивлением такие методы малоэффективны из-за большого затухания микроволновых колебаний, проходящих через исследуемый материал, в результате не представляется возможным точно определить содержание влаги в большом объеме угля.

Таким образом, проблема контроля влажности различных угольных пород в больших объемах требует нового подхода к решению.

Новый метод определения влажности угольных пород при помощи радиоволн

В качестве решения проблемы предлагается разработанный метод контроля влаги, который применим для углей с различной удельной электропроводимостью.

Предлагаемая технология определения влажности угольных пород основана на радиоволновых фазометрических измерениях с применением гомодинного метода преобразования частоты [13-14]. Суть метода заключается в том, что по

набегу фазы радиосигнала при его прохождении через контролируемый материал с учетом температуры определяют диэлектрическую проницаемость двухкомпонентной среды (уголь и вода), после чего по полученным данным согласно математической модели вычисляют влажность угля.

Устройство, позволяющее реализовать разработанный метод, конструктивно состоит из измерительного блока, транспондера и блока управления (рис. 4). Принцип работы устройства следующий. В измерительном блоке на выходе генератора (Г) формируют радиосигнал, описываемый следующим выражением:

$$u_1(t) = U_1 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1), \quad (1)$$

где U_1 — амплитуда радиосигнала; f_1 — частота радиосигнала; φ_1 — начальная фаза радиосигнала.

После чего, радиосигнал с выхода генератора через коаксиальный циркулятор подают на антенну (A_1) при помощи которой первично излучают электромагнитные колебания в направлении транспондера.

При прохождении через контролируемый уголь колебания приобретают набег фазы равный:

$$\Delta\varphi_1 = \frac{2\pi f_1 d \sqrt{\varepsilon}}{c}, \quad (2)$$

где d — расстояние между измерительным блоком и транспондером; ε — диэлектрическая проницаемость контролируемого материала; c — скорость света.

В транспондере при помощи антенны (A_2) первично принимают измерительный радиосигнал с амплитудой U_2 , который имеет вид:

$$u_2(t) = U_2 \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1 + \Delta\varphi_1), \quad (3)$$

Далее принятый в транспондере измерительный сигнал через коаксиальный циркулятор и полосно-пропускающий фильтр (ППФ) подают на вход усилителя (У). Сигнал с выхода усилителя подают на сигнальный вход управляемого фазовращателя, на управляющий вход которого подают синхронизирующий сигнал, полученный УКВ приемником (УКВ 2.1).

Низкочастотный сигнал синхронизации имеет вид:

$$u_3(t) = U_3 \cos(2\pi F_1 t + \varphi_{CR}), \quad (4)$$

где U_3 — амплитуда синхронизирующего сигнала; F_1 — частота сигнала синхронизации; φ_{CR} — начальная фаза сигнала синхронизации.

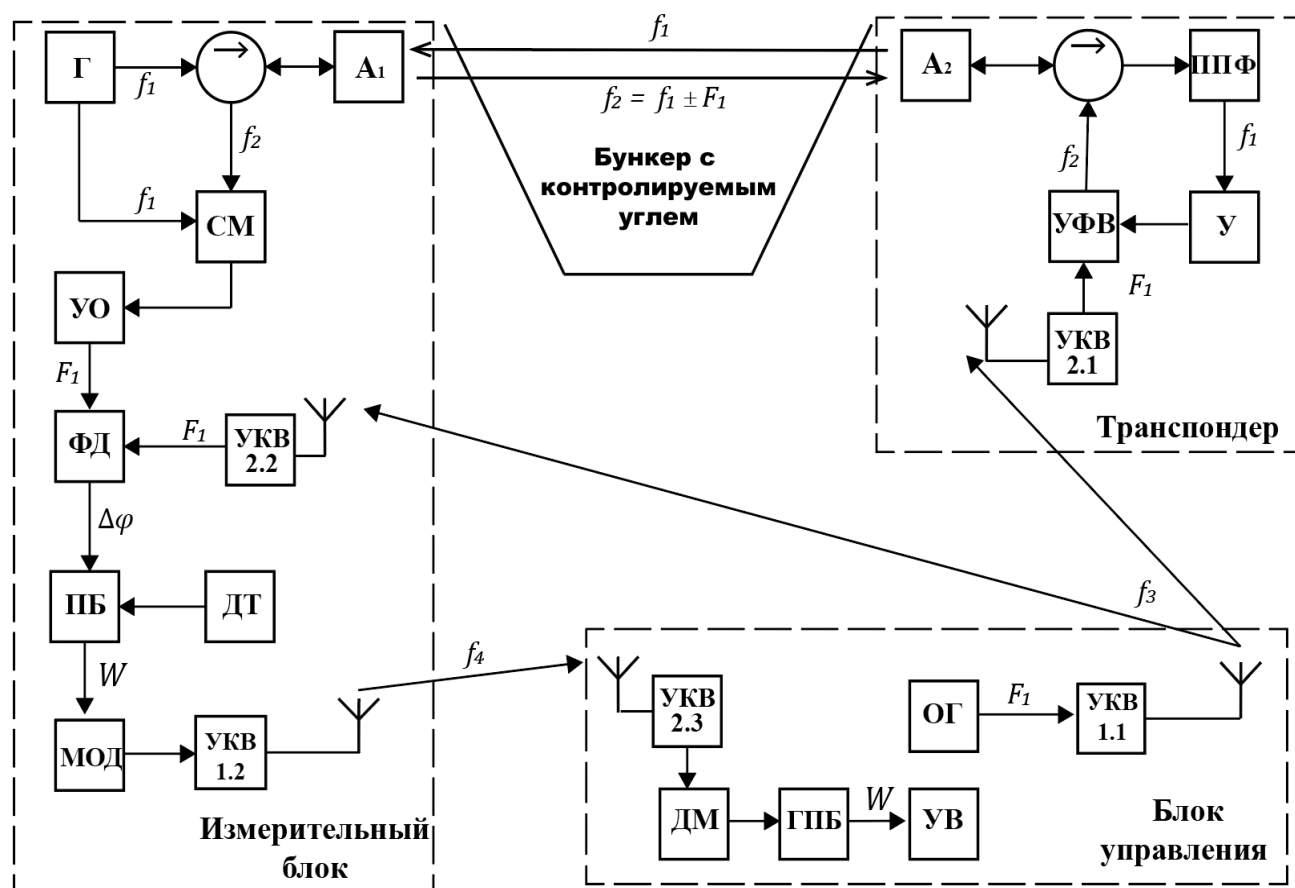


Рис. 4. Структурная схема разработанного устройства.

В фазовращателе в колебания с частотой f_1 вносят периодический монотонно нарастающий от 0 до 2π (или убывающий) фазовый сдвиг, с периодом равным T_1 . При этом можно говорить о сдвиге спектра радиосигнала на частоту Доплера $F_1 = 1/T_1$.

Таким образом, осуществляют сдвиг частоты измерительного сигнала с частотой f_1 на величину равную частоте F_1 сигнала синхронизации. Трансформированный по частоте сигнал с новой частотой $f_2 = f_1 \pm F_1$ имеет вид:

$$u_4(t) = U_4 \cos[2\pi f_2 t + \varphi_1 \pm \varphi_{CR} + \Delta\varphi_1], \quad (5)$$

где U_4 — амплитуда трансформированного сигнала с учетом усиления в усилителе и ослабления в фазовращателе.

Сигнал с частотой f_2 с выхода управляемого фазовращателя подают на антенну транспондера (A_2), с помощью которой вторично излучают эти колебания обратно в направлении измерительного блока.

При втором прохождении контролируемого

участка сигнал приобретает набег фазы равный:

$$\Delta\varphi_2 = \frac{2\pi f_2 d \sqrt{\epsilon}}{c}, \quad (6)$$

Стоит отметить, что частота f_1 измерительного сигнала много больше частоты F_1 низкочастотного синхронизирующего сигнала соответственно можем принять, что $f_2 \approx f_1$ и, следовательно $\Delta\varphi_1 \approx \Delta\varphi_2$.

Тогда в измерительном блоке вторично принятый сигнал описывается следующим выражением:

$$u_5(t) = U_5 \cos[2\pi f_2 t \pm \varphi_{CR} + 2\Delta\varphi_1], \quad (7)$$

где U_5 — амплитуда вторично принятых колебаний.

Этот сигнал через циркулятор подают на вход смесителя (СМ), на другой вход которого подают исходный сигнал с выхода генератора.

В смесителе осуществляют гомодинное преобразование частоты. Преобразованный по частоте низкочастотный сигнал имеет вид:

$$u_6(t) = U_6 \cos[2\pi F_1 t \pm \varphi_{CR} + 2\Delta\varphi_1], \quad (8)$$

где U_6 — амплитуда преобразованного сигнала.

После чего этот сигнал через усилитель

ограничитель (УО) подают на первый вход фазового детектора (ФД), на опорный вход которого подают синхронизирующий сигнал, полученный УКВ приемником измерительного блока (УКВ 2.2).

В результате на выходе фазового детектора получают информационный сигнал:

$$u_7(t) = K[2\pi F_1 t + 2\Delta\varphi_1 + \varphi_{CR} - 2\pi F_1 t - \varphi_{CR}] = K 2\Delta\varphi_1, \quad (9)$$

где K — коэффициент преобразования фазового детектора.

Таким образом, зная расстояние d между измерительным блоком и транспондером, определяют изменения относительной диэлектрической проницаемости ε контролируемого угля.

Далее информационный сигнал подают на вход процессорного блока (ПБ) на второй вход которого подают сигнал с выхода измерителя температуры контролируемой среды (ДТ) для температурной коррекции измерений.

В процессорном блоке с учетом температуры согласно математической модели определяют влажность контролируемого угля.

На выходе процессорного блока получают цифровой код, соответствующий результату вычисления влажности угля.

Цифровой сигнал подают на вход модулятора (МОД), где его преобразуют в модулирующий сигнал и подают на вход модулятора УКВ передатчика (УКВ 1.2), и излучают с несущей частотой f_4 в направлении блока управления.

В блоке управления сигнал пропорциональный изменению влажности угля принимают с помощью УКВ приемника (УКВ 2.3) и подают на вход демодулятора (ДМ).

Демодулированный цифровой сигнал подают на вход главного процессорного блока (ГПБ), который передает информацию на устройство вывода для оператора.

Синхронизация блоков устройства осуществляется из блока управления. На выходе опорного генератора (ОГ) формируют низкочастотный сигнал синхронизации с частотой F_1 и с помощью УКВ передатчика (УКВ 1.1) излучают с несущей частотой f_3 в направлении измерительного блока и транспондера.

Стоит отметить, что на базе описанного устройства возможно организовать систему мониторинга влажности угля, состоящую из нескольких измерительных устройств с общим центром управления.

Математическая модель и параметры измерения влажности угольных пород

Для организации измерений по описанному выше методу представляется возможным использовать частоту в районе 434 МГц в диапазоне ISM. Измерения на такой рабочей частоте, позволят в большом объеме контролировать угольные породы с различной удельной электропроводимостью. Частота сигнала синхронизации 1 кГц.

Модель вычисления влаги по полученной диэлектрической проницаемости смеси будет основана на алгоритме, описанном в [6].

Такая модель учитывает диэлектрическую проницаемость смеси ε'_{2mix} в состоянии угля со связанной влагой в соответствии с формулой Рейнольдса-Хью:

$$\varepsilon'_{1mix} = \varepsilon'_{1dry} + \varepsilon'_{1dry} W_{b.m} (\varepsilon'_{1b.m.} - \varepsilon'_{1dry}) \times \left[\varepsilon'_{1dry} + A(\varepsilon'_{1b.m.} - \varepsilon'_{1dry}) \right]^{-1}, \quad (10)$$

где ε'_{1dry} — диэлектрическая проницаемость сухого угля; $\varepsilon'_{1b.m.}$ — диэлектрическая проницаемость связанной влаги; A — деполяризационный фактор; $W_{b.m}$ — содержание связанной влаги.

Диэлектрическая проницаемость связанной влаги $\varepsilon'_{1b.m.}$ меняется в диапазоне от 4,5 до 5,8, а деполяризационный фактор A равен 0,33.

Состояние угля со свободной влагой описывается модифицированной формулой Лихтенекера:

$$\varepsilon'_{2mix}(W, \lambda, T, \alpha) = \varepsilon'_2(\lambda, T)^{W^\alpha} + \varepsilon'_{1mix}(1-W)^\alpha, \quad (11)$$

где $\varepsilon'_2(\lambda, T)$ — диэлектрическая проницаемость свободной влаги; W — влажность угля; α — коэффициент, учитывающий тип смеси;

Согласно [6] расчетная дисперсионно-температурная зависимость действительной части диэлектрической проницаемости $\varepsilon'_2(\lambda, T)$ для свободной воды имеет вид:

$$\varepsilon'_2(\lambda, T) = 5 + \frac{83,2 - 0,3775T}{1 + \left(\frac{1,21 \times 10^{-5} \times e^{\frac{2175}{T+273}}}{\lambda} \right)^2}, \quad (12)$$

где λ — длина волны измерительного сигнала; T — температура контролируемой среды.

Коэффициент α меняется от 0,5 до 1, где $\alpha = 0,5$ соответствует матричной смеси, $\alpha = 1$

описывает свойства статистических смесей. Так как влажный уголь является двухкомпонентной неупорядоченной средой, он представляет собой нечто среднее между матричными и статистическими смесями.

Таким образом, значение коэффициента α лежит внутри указанного интервала. Выбор $\alpha = 0,7$ основан на эмпирических данных из [15]. В зависимости от неоднородности смеси значение α может меняться в указанном диапазоне.

График математического моделирования вычисления влажности угля согласно описанной модели приведен на рис.5.

Условия моделирования следующие. Длина волны измерительного сигнала $\lambda = 0,69$ м, что соответствует частоте $f = 434$ МГц. Температура среды $T = 20$ °С, коэффициенты $A = 0,33$, $\alpha = 0,7$. Исходная диэлектрическая проницаемость сухого угля $\epsilon'_{dry} = 4$, диэлектрическая проницаемость связанной влаги $\epsilon'_{b.m.} = 5,8$. Содержание связанной влаги $W_{b.m.} = 0,05$ [16]. Интервал изменения влажности $W = 0...0,3$.

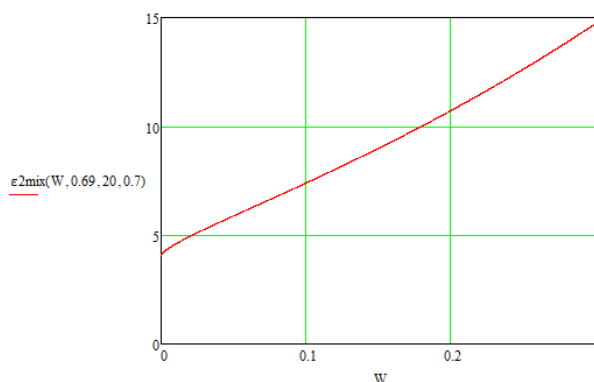


Рис. 5. Результаты моделирования зависимости диэлектрической проницаемости смеси уголь-вода от влажности при заданных параметрах.

Таким образом, при определении диэлектрической проницаемости смеси ϵ'_{2mix} с помощью разработанного метода и некоторых исходных данных можно вычислить влажность контролируемого угля. Исходные данные будут корректироваться в соответствии с полученными экспериментальными исследованиями.

Заключение

В рамках статьи проведен сравнительный

анализ существующих контактных массово-весовых и бесконтактных микроволновых амплитудных методов и приборов контроля влажности угля.

Выявлены такие недостатки используемых методик: длительность измерений и сложность процедуры отбора пробы у массово-весовых методов, ограниченные возможности в контроле различных угольных пород у микроволновых методов. Перечисленные недостатки не позволяют организовать высокоточный контроль влаги в больших объемах угля с различной удельной электропроводимостью.

В качестве решения проблемы предложен новый радиоволновый фазометрический метод определения влажности угольных пород.

Метод основан на определении диэлектрической проницаемости угольной гетерогенной среды при помощи измерения набега фазы радиосигнала при его прохождении через контролируемый материал. В методе предусмотрена температурная компенсация при измерении диэлектрической проницаемости исследуемого угля.

Приведена структурная схема устройства для реализации разработанного метода и рассмотрены теоретические возможности его работы. Также возможна реализация метода в виде системы мониторинга влажности угольных пород, состоящей из нескольких измерительных устройств с общим удаленным центром мониторинга. Системный подход позволит централизованно контролировать содержание влаги в угле в различных технологических процессах в рамках одного предприятия.

Представлена математическая модель вычисления влажности по измеренной диэлектрической проницаемости смеси. Описанная модель учитывает различные формы связи влаги в угле, что позволяет осуществлять контроль над влажностью на всех производственных стадиях добычи и обработки угольных пород. Результаты моделирования при заданных параметрах представлены в виде графика.

Разработанный радиоволновый метод контроля влаги в угле может быть использован в различных отраслях промышленности и производственных процессах.

Список литературы

1. Sivrikaya O. Cleaning study of a low-rank lignite with DMS, Reichert spiral and flotation. Fuel 2014. P. 252-258.
2. Агроскин А.А. Физические свойства углей / А.А.

- Агроскин. — М.: ГНТИЛ по черн.и цветн. металлургии, 1961. — 308 с.
3. Агроскин А.А. Химия и технология угля. — М.: Недра, 1969. — 240 с.
 4. Берлинер М.А. Электрические измерения, автоматический контроль и регулирование влажности. — М.: Энергия, 1965. — 354 с.
 5. Казанский М. Ф. Анализ форм связи и состояния влаги, поглощенной дисперсным телом, с помощью кинетических кривых сушки // Докл. АН СССР, 1960. С.1059–1062.
 6. Федюнин П.А. Микроволновая термовлагодетрия / Под общ. ред. П.А. Федюнина. М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. — 208 с.
 7. ГОСТР 52911-2020 Топливо твердое минеральное. Методы определения общей влаги. — М.: Станмгптефем, 2021. — 16 с.
 8. ГОСТ 11014-2001 Угли бурые, каменные, антрацит и горючие сланцы. Ускоренные методы определения влаги. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. — 3 с.
 9. ГОСТ 10742-71 Угли бурые, каменные, антрацит, горючие сланцы и угольные брикеты. Методы отбора и подготовки проб для лабораторных испытаний. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. — 19 с.
 10. Система автоматического контроля влажности угля непосредственно в технологическом потоке с использованием влагомера типа «ИВА-1.1», Институт обогащения твёрдого топлива ОАО «ИОТТ» [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.iott.ru/doc/production/iva> обр.10.05.2021.
 11. Конвейерный влагомер сыпучих материалов КА 500 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.konvels.ru/index.php?mode=1&id=174&pid=78> обр.10.05.2021.
 12. Датчики влажности сыпучих материалов M-Sens 2 [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://rusautomation.ru/analizatory-vlazhnosti/m-sens2/princip-raboty-m-sens2> обр.10.05.2021.
 13. Shirokov I. B., Ivashina M. V. Amplitude and Phase Progression Measurements on Microwave Line-of-Sight Links // IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'01), Sydney, Australia, 9-13 July 2001, P. 3144-3145.
 14. Shirokov I. B., Shaban S. Experimental Investigations of Amplitude and Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links // IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'02), Toronto, Canada, 24-28 June 2002, Vol. VI, P. 3559-3560.
 15. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. — К.: Наук. думка, 2010. — 423 с.
 16. Дерягин Б.В. Вода в дисперсных системах. — М.: Химия, 1989. — 288 с.
 - with DMS, Reichert spiral and flotation. Fuel 2014. P. 252-258.
 2. Agroskin A.A., Physical properties of coal. GNTIL in black and color. metallurgy, Moscow, 1961, 308p.
 3. Agroskin A.A., Chemistry and technology of coal, Moscow, Nedra, 1969, 240 p.
 4. Berliner M. A. Electrical measurement, automatic control and regulation of humidity, Moscow, Energy, 1965, 354 p.
 5. Kazansky M. F., Analysis of the bond forms and the state of moisture absorbed by a dispersed body with the help of kinetic drying curves // Docl. USSR Academy of Sciences, 1960. pp. 1059-1062.
 6. P.A. Fedyunin., Microwave thermohydrometry, Publishing house of mechanical engineering-1, 2004, 208 p.
 7. GOSTR 52911-2020 Solid mineral fuel. Methods for determining the total moisture, Moscow, Stanmgptfeyem, 2021, 16 p.
 8. GOST 11014-2001 Brown, stone, anthracite and oil shale coals. Accelerated methods for determining moisture, Moscow, IPK Publishing House of Standards, 2002. 3 p.
 9. GOST 10742-71 Brown, stone, anthracite, oil shale and coal briquettes. Methods of sampling and preparation of samples for laboratory tests, Moscow, IPK Publishing House of Standards, 2001. 19 p.
 10. Automatic control system for coal moisture directly in the process flow using a moisture meter of the IVA-1.1 type, Institute for Solid Fuel Enrichment [Electronic resource]. — Режим доступа: <http://www.iott.ru/doc/production/iva> (accessed 10.05.2021).
 11. Conveyor moisture meter of bulk materials KA 500 [Electronic resource]. — Режим доступа: <http://www.konvels.ru/index.php?mode=1&id=174&pid=78> (accessed 10.05.2021).
 12. M-Sens 2 Bulk material moisture sensors [Electronic resource]. — Режим доступа: <https://rusautomation.ru/analizatory-vlazhnosti/m-sens2/princip-raboty-m-sens2>(accessed 10.05.2021).
 13. Shirokov I. B., Ivashina M. V. Amplitude and Phase Progression Measurements on Microwave Line-of-Sight Links // IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'01), Sydney, Australia, 9-13 July 2001, P. 3144-3145.
 14. Shirokov I. B., Shaban S. Experimental Investigations of Amplitude and Phase Progression Fluctuations on Microwave Line-of-Sight Links // IEEE Proc. of Int. Symp. on Geoscience and Remote Sensing (IGARSS'02), Toronto, Canada, 24-28 June 2002, Vol. VI, P. 3559-3560.
 15. Alekseev A.D., Physics of coal and mining processes, Nauk Dumka, 2010, 423 p.
 16. Deryagin B.V., Water in dispersed systems, Moscow, Chemistry, 1989, 288 p.

References

1. Sivrikaya O., Cleaning study of a low-rank lignite

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК.550.837.3

Исследование электрохимического метода коагуляции природной воды

А.М. Акимов, С.А. Котельникова, Е.В. Слизченко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, svetlana.83@inbox.ru

Статья поступила 05.04.2021 г.; после доработки 07.04.2021 г.

Аннотация

В результате данного исследования был проведен анализ природной воды на наличие ионов, которые оказывают пагубное воздействие на теплопередающие поверхности аппаратов или трубопроводов на теплоэнергетических предприятиях, исследована установка для проведения очистки воды от ионов кремниевой кислоты с помощью электрокоагуляции.

Ключевые слова: вода, электрокоагуляция, методы водоподготовки, кремнийсодержащие ионы, теплоэнергетические предприятия.

Investigation of the electrochemical method of natural water coagulation

A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova, E.V. Slizchenko

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, svetlana.83@inbox.ru

Received 05.04.2021 y.; received in final form 07.04.2021 y.

Abstract

As a result of this study, the analysis of natural water for the presence of ions that have a detrimental effect on the heat transfer surfaces of apparatuses or pipelines at thermal power plants was carried out, the installation for water purification from silicic acid ions using electrocoagulation was investigated.

Keywords: water, electrocoagulation, water treatment methods, silicon-containing ions, thermal power plants.

Введение

Электрохимические методы находят широкое применение, когда традиционные способы механической, биологической и физико-химической подготовки воды оказываются недостаточно эффективными или не могут использоваться, например, из-за дефицита производственных площадей, сложности доставки и использования реагентов или по другим причинам.

Такие технологические установки в совокупности этих методов имеют небольшие размеры, большую производительность, легко поддаются контролю и автоматизации.

Нередко электрохимическая обработка используется в сочетании с другими методами очистки, позволяя благополучно очищать природные воды от примесей различного состава и дисперсности.

Электрохимическая очистка воды основана на электролизе, сущность которого заключается в

использовании электрической энергии для проведения процессов окисления и восстановления.

Отличительная особенность электрохимической реакции – пространственное разделение электрохимических реакций на два сопряженных процесса: процессы разложения веществ или получения новых продуктов происходят на границе электрод–раствор при помощи электрического тока.

При проведении электролиза одновременно с электродными реакциями в объеме раствора происходят изменение pH и окислительно–восстановительного потенциала системы, а также фазово-дисперсные превращения примесей воды.

Электрохимические методы обработки воды можно разделить на три основные группы.

Первая группа обеспечивает изменение физико – химических характеристик загрязнений с целью их обезвреживания или более быстрого извлечения из воды. Из методов этой группы наиболее широко используется метод электрокоагуляции.

Вторая группа предназначена для концентрирования примесей в ограниченном объеме электролита без существенного изменения фазово - дисперсных или физико – химических свойств извлекаемых веществ. Разделение примесей и воды происходит в основном за счет флотации электрогенерируемыми пузырьками газа или силового действия электрического поля, обеспечивающего транспорт заряженных частиц в жидкости – метод электрофлотации.

Из электрохимических методов разделения наибольшее распространение получил метод электродиализа с целью обессоливания природных и промышленных сточных вод.

Третью группу составляют комбинированные методы, которые предполагают совмещение одного или нескольких методов превращения и разделения загрязнений в одном аппарате. Эта группа в основном применяется для очистки сточных вод [1,2].

Постановка цели и задач научного исследования

Объектом исследования является природная вода из р. Черная для очистки ее от соединений кремния с применением электрокоагуляции где в качестве анода взят ион алюминия. Цель работы – изучить процесс очистки воды от кремний содержащих веществ с помощью электрокоагуляции.

Результаты научного исследования

Для проведение экспериментального исследования очистки природной воды от примесей электрокоагуляцией была выбрана воды из р. Черная, г. Севастополя, Российская Федерация. Был проведен химический анализ проб р. Черная, пробы отбирались в районе села Штурмовое, Балаклавского района, г. Севастополя, таблица 1.

Таблица 1. Результаты химического анализа воды

Показатели	Размерность	Значение
Температура	°C	19
pH	ед	7,568
Окисляемость	O ₂ /л	5,13
Сухой остаток	мг/л	980
Жесткость общая	мг – экв/кг	3,576
Щелочность	мг – экв/кг	2,221
Концентрация ионов кремния	мг – экв/кг	0,176
Концентрация ионов железа (3)	мг – экв/кг	0,9
Концентрация хлоридов	мг – экв/кг	1,172
Концентрация сульфатов	мг – экв/кг	1,221
Концентрация натрия	мг – экв/кг	1,1
Концентрация нитратов	мг – экв/кг	0,86

Электрокоагуляция – это процесс очистки воды от коллоидных и мелкодисперсных примесей с использованием коагулянтов – гидроксидов металлов (алюминия, железа) – можно осуществлять, пропуская воду через электролизер с анодами из указанных металлов (алюминий, железо). Металл анодов под действием постоянного тока ионизируется и переходит в очищаемую воду.

Образующиеся в воде гидроксиды алюминия или железа коагулируют дисперсную фазу.

В качестве анода, участвующего в процессе электрохимической обработки воды, был выбран растворимый анод из сплавов алюминия. Основой для этого выбора послужили такие преимущества алюминия:

1. Коагулирующие (связующие) действие иона – коагулянта прямопропорционально его заряду в шестой степени. Заряд иона коагулянта алюминия Al^{3+} , т.е. связующие возможности $3^6=729$, исключительно привлекательны для процесса;

2. Ион коагулянт алюминия Al^{3+} – очень сильный восстановитель, поэтому в природе «чистый алюминий» отсутствует, а присутствует только в виде соединений гидроксида алюминия,

сернистого алюминия, оксида алюминия и т.д;

3. Коагулянт в виде гидроксида алюминия не взаимодействует с водой;

4. Многозарядный ион алюминия Al^{3+} обладает положительной гидратацией имеет большой заряд и малый радиус, что позволяет прочно связывать и сильно удерживать молекулы воды;

Эти качества растворимого анода на основе сплавов алюминия способствует тому, что образующийся в процессе электрохимической обработке воды коагулянт, мощно связывает все «грозди» разбитых на ионы и катионы всех находящихся в воде химических веществ и соединений.

С электродов (катода и анода) выделяется водород и кислород, которые подхватывают это «грозди» и поднимают их на поверхность вместе с коагулянтом. На поверхности образуется шлам (грязь), его удаляют с помощью фильтрации. Это способствует снижению в воде содержания алюминия, участвовавшего в электрохимических реакциях, до ничтожных значений ниже норм, установленных Госсанэпиднадзором [10].

Эксперимент проводился в следующей последовательности: в емкость с отобранной пробой воды (1л) опускались электроды в качестве анода – алюминий, в качестве катода – нержавеющая сталь и установка подключалась к источнику постоянного тока, далее вода отфильтровывалась от шлама и измерялась концентрация кремния фотометрическим методом.

В результате были получены следующие данные:

1. Была определена зависимость потери веса анодом (т.е. растворение алюминия в воде). Средняя потеря веса составляла от 0,12 – 0,16 г в минуту. Зависимость представлена на рис.1

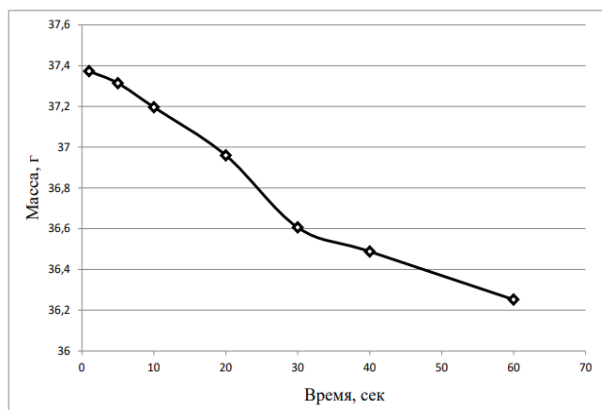


Рис.1. Зависимость потери веса от времени процесса

2. Исследовали зависимость концентрации

кремниевой кислоты от напряжения на установке. Концентрация кремния уменьшалась в среднем на 0,25 мг/л на каждые 5 В подводимого напряжения (Рис. 2).

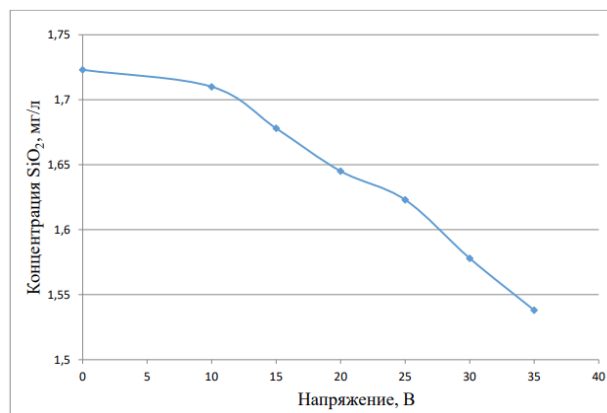


Рис. 2. Зависимость концентрации от подводимого напряжения.

3. Исследовали как изменяется концентрация от времени пропускания электрического тока, через исследуемую воду. На первоначальном этапе концентрация кремния уменьшалась в среднем на 0,0145 мг/л (первые 15 минут), далее наблюдалось лавинообразное падение концентрации с 15 до 30 минут, на 0,04625 мг/л. После сильного падения концентрация исследуемого иона примерно оставалась на одном уровне и не изменялась вплоть до 60 минуты исследования. Данные представлены на рисунке 3.

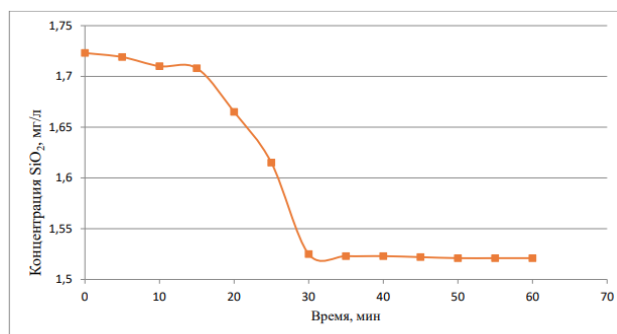


Рис. 3. Зависимость концентрации кремния от времени действия тока.

В результате проведенного эксперимента было определено, что использование в качестве коагулянта алюминия (Al^{3+}) для удаления из природной воды соединений кремния под действием постоянного тока довольно эффективный процесс, по выше изложенным графикам и таблицам можно судить об довольно неплохой очистке от

соединений кремния по сравнению с обычной коагуляцией с применением коагулянтов ($\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ либо при их совместном действии).

2010. - 57 р.

Заключение

Предложен метод коагуляции воды основанный на процессе электрохимической обработки воды, где в качестве анода выбран сплав алюминия. Предложенный метод имеет ряд преимуществ и недостатков.

К преимуществам можно отнести:

1. Компактность установки и простота управления процессом;
2. Отсутствие реагентов для поддержания процесса либо его корректировки;
3. Не зависимость от колебания температуры и кислотно-щелочного состояния среды;
4. Постоянный электрический ток разрушает химические соединения и выделяется кислород, который в свою очередь является одним из средств обеззараживания воды.

Недостатки данного метода:

1. Металлоемкость процесса (разрушение алюминиевого анода);
2. Невысокая производительность установки;
3. Образование шлама, которые после необходимо отфильтровывать.

Данный метод электрохимической коагуляции может быть применим как для очистки природных вод, так и для сточных вод различных промышленных предприятий.

Список литературы

1. Пантелеев А.А., Рябчиков Б.Е., Хоружий О.В. и др. Технологии мембранного разделения в промышленной водоподготовке. – М.: ДеЛи плюс, 2012. – 429 с.
2. Водоподготовка и водопользование: сборник трудов международной научно практической конференции. Санкт-Петербург, 25–26 ноября 2010 года/ под редакцией профессора А.Н. Иванова; ГОУВПО СПб ГТУ РП. – Спб., 2010.– 57 с.

References

1. Panteleev A. A., Ryabchikov B. E., Horuzhiy O. V., etc. Technologies of membrane separation in industrial water treatment. - Moscow: Delhi Plus, 2012. - 429 p.
2. Water treatment and water use: proceedings of the international scientific and practical conference. St. Petersburg, November 25-26, 2010 / edited by Professor A. N. Ivanov; GUVPO SPb GTU RP. - Spyu.,

УДК.550.837.3

Исследование пылезакрепляющих растворов при транспортировании горных масс

А.М. Акимов, С.А. Котельникова

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, svetlana.83@inbox.ru*

Статья поступила 12.04.2021 г.; после доработки 14.04.2021 г.

Аннотация

*Исследован состав пылезакрепляющих растворов при перевозке горных масс на горнорудных предприятиях.**Ключевые слова:* горная масса, пылевые частицы, ГИПАН, полиакриламид, бишофит.

Investigation of dust-retaining solutions during transportation of rock masses

A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, svetlana.83@inbox.ru

Received 12.04.2021 y.; received in final form 14.04.2021 y.

Abstract

*The composition of dust-fixing solutions during the transportation of rock masses at mining enterprises is studied.**Keywords:* rocks, dust particles, GIPAN, polyacrylamide, bishofit.

Введение

Борьба с запыленностью воздуха при транспортировании горной массы на предприятиях ведется по следующим направлениям: гидрообеспыливание, локализация источников пылеобразования за счет связывания пылевых частиц и создание поверхностных пленок (корок) [1,2]. Различают несколько способов гидрообеспыливания: типовые гидрооросительные системы, пневмогидроорошение и др. При гидрообеспыливании основными факторами, влияющими на эффективность пылеподавления, является величина удельного расхода жидкости, фракционный состав перевозимой рудной массы, климатические условия, способ и средства гидрообеспыливания,

присутствие смачиваемых добавок [3].

Способ связывания пылевых частиц в растворе заключается в скреплении их между собой с образованием устойчивого противозрозионного слоя. При обработке поверхности крупнокускового штабеля пространство между частицами заполняется связующим раствором, после чего под воздействием химических, физико-механических и механических процессов происходит взаимодействие компонентов раствора и минералов горной массы [4].

Постановка цели и задач научного исследования

С целью ликвидации пыления хвостов ГМЗ

при их возможной транспортировке на закладочные комплексы шахт в железнодорожных вагонах, в лабораторных условиях изучалась пылеподавляющая способность следующих пленкообразующих веществ: универсин, латекс, полимер К-9, битумная эмульсия, сульфидно-дрожжевая

бражка (СДБ), жидкое стекло.

Оценка эффективности закрепления проводилась при скорости воздушного потока 15-17 м/с, постоянной температуре и влажности поверхностного слоя хвостов ГМЗ. Продолжительность продувки составляла 20 ч. Оценка действия различных видов закрепителей представлена в табл. 1

Таблица 1. Технологические характеристики закрепления хвостов ГМЗ.

Закрепитель	Концентрация закрепителя, %	Расход раствора, л/м ²	Удельная сдуваемость, мг/(м ² ·с)	Эффективность пылеподавления, %	Состояние поверхности
Нет закрепителя	0	0	20,0	0	Несвязанные хвосты с влажностью поверхностного слоя 7-8%
Универсин	50	3,0	19,3	3,5	Поверхность рыхлая, без корки, несвязанные хвосты
Латекс БС-50	10	1,5	0,5	97,5	Поверхность ровная без трещин, толщина пленки 1,5-2,0 мм
Полимер К-9	2,5	1,5	15,3	23,5	Корка потрескалась, толщина корки 2,0-2,5 мм
Битумная эмульсия	15	3,0	0	100	
50% СДБ	20	3,0	0	100	Поверхность ровная без трещин, корка толщиной 2,5-3,0 мм, прочная
Жидкое стекло	30	3,0	0	100	Поверхность ровная без трещин, корка толщиной 3-4 мм, очень прочная

Наиболее эффективным и дешевым закрепляющим веществом является 20%-ный водный раствор СДБ (таблица 1). Обработка поверхности хвостов ГМЗ этим раствором при его расходе 3,0 л/м² полностью исключает сдувание пыли при скорости воздушного потока 15-17 м/с.

Основным недостатком закрепителя СДБ в зимних условиях (при отрицательных температурах) является примерзание влажной горной массы к внутренним системам железнодорожных вагонов. В качестве трудно замерзающей жидкости используют водный раствор природного бишофита, который добывается в нефтеносных районах (Башкирия РФ, Полтавская область, Украина и др.).

Водный раствор бишофита применяют для борьбы с пылью на дорогах, с обледенением дорожного зимой, для получения окатышей на аглофабриках и др. По своим физико-химическим свойствам раствор природного бишофита соответствует нормам ТУ 2.529511-003, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2. Физико-химические свойства бишофита.

Наименование показателей	Норма
1. Внешний вид	Водная, бесцветная или желтоватая жидкость, масляная на ощупь, без запаха
2. Плотность при 200С, кг/м ³	Не менее 1250
3. Общая минерализация, кг/м ³	Не менее 320
4. Растворимость в воде	Хорошая
5. Агрессивность	Не агрессивен
6. Токсичность	Не токсичен
7. Пожароопасность	Не горючий
8. Взрывоопасность	Не взрывоопасен
9. Массовая доля, % ионов магния хлористого магния хлористого натрия сульфат ионов	не менее 7 не менее 24 не более 5 не более 1

хлористого кальция	не более 0,5
--------------------	--------------

Главное достоинство бишофита для пылящих поверхностей – его высокая гигроскопичность. В открытых емкостях он не высыхает даже в самые жаркие периоды года. Бишофит по сравнению с водой и водным раствором NaCl в 1,5-2,0 раза меньше вызывает коррозию черных металлов.

Таким образом обрабатывая бишофитом железнодорожные вагоны от примерзания руды, можно без дополнительных затрат обрабатывать

поверхность горной массы с целью ее закрепления от пыления.

Результаты научного исследования

С учетом вышеизложенного была проведена серия лабораторных экспериментов, которая включила в себя приготовление закрепляющего состава, нанесение его на поверхность руды в моделях вагона методом распыления, продувку модели вагона в аэродинамической трубе через час после закрепления, через одни сутки, двое, трое суток после закрепления.

При этом в каждом случае определялась удельная сдуваемость. Результаты лабораторных исследований приведены в таблице 3.

Таблица 3. Удельная сдуваемость пыли с поверхности руды в моделях железнодорожных вагонов при закреплении ее исследуемыми реагентами.

№ пп	Состав исследуемого закрепителя	Расход закрепителя, л/м ²	Срок выдержки с момента закрепления до начала продувки, ч, мин.	Удельная сдуваемость, г/м ² ·с	Примечание
1	Незакрепленная руда	–	–	24,58	Руда обдувалась в моделях ж.-д. вагонов, выполненных в масштабе 1: 25. Время продувки – 30 мин. (1800 с), скорость потока воздуха – 15 м/с. Влажность руды, не обработанной закрепителем – 2,5 %
2	<u>Состав № 1</u> Бишофит – 50 % Вода – 50 %	3,0	1 ч 67 ч 30 мин	1,14 0,00	
3	<u>Состав № 2</u> ГИПАН – 1 часть Вода – 5 частей	5,0	1 ч 21 ч 30 мин 46 ч 74 ч	0,76 1,55 0,11 0,00	
4	<u>Состав № 3</u> Жидкое стекло + вода, Бикарбонат натрия (пищевая сода) – 40 г/л	3,0	1 ч 30 мин 24 ч 40 мин 48 ч 30 мин	0,625 0,80 1,36	Относительная влажность атмосферного воздуха – 75 %, температура воздуха – от 4 до 10 °С.
5	<u>Состав № 4</u> Жидкое стекло – 10 % Бишофит – 3 % Вода – 87 %	5,0	1 ч 67 ч 40 мин	0,00 0,09	
6	<u>Состав № 5</u> Релаксол– НОРМА – 1 ч Вода – 5 ч	3,0	1 ч 45 ч 40 мин	0,00 1,00	

Полученные данные свидетельствуют о достаточно высокой эффективности исследуемых закрепляющих растворов. Однако в наибольшей степени пылеобразование снижает состав №4. Через 1 час после закрепления руды этим составом при скорости воздушного потока, равной 15 м/с, пыление руды в моделях железнодорожных вагонов отсутствовало. Через трое суток удельная сдуваемость была равной 0,09 мг/м²·с, что также свидетельствует о его высокой закрепляющей способности.

Однако приготовление состава №4 в промышленных условиях может вызвать определенные трудности. Это связано с тем, что жидкое стекло и бишофит должны растворяться водой в разных емкостях, после чего раствор жидкого стекла (а не наоборот) должен вливаться при непрерывном помешивании в раствор бишофита. В противном случае смесь превращается в гелеобразную студенистую массу, которую невозможно использовать для закрепления пылящих поверхностей.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. Все исследованные закрепляющие составы могут быть использованы для уменьшения (исключения) пылеобразования при перевозке горных масс;
2. Двухкомпонентные составы использовать значительно проще в технологическом отношении, и им в первую очередь должно быть отдано предпочтение при выборе состава закрепителя для применения в промышленных масштабах;
3. Наиболее эффективным закрепителем по результатам проведенных исследований является трехкомпонентный состав №4 (жидкое стекло – 10 %, бишофит – 3 %, вода – 87 %) при расходе 5,0 л/м²;
4. Составы № 1, 2 и 5 являются технологичными в приготовлении и использовании, хорошо удерживают пылевые фракции, предотвращают их взмывание набегающим потоком воздуха в течение двух-трех суток и могут быть рекомендованы наряду с составом № 4 к промышленному испытанию и освоению.

Список литературы

1. Рекомендации по технологии закрепления и гидрообеспыливаю хвостохранилищ. –

ВНИИБТГ. 1990. – 30с.

2. Ващенко В.С., Гайдук В.П., Шувалов Р.П. Обеспыливание при открытом складировании руд //Горный журнал. – 1972. – №9. – С. 73-75.
3. Акимов А.М. Способ предотвращения пылеобразования на поверхности хвостохранилищ отходов переработки гидрометаллургического завода //Сборник научных трудов СТУЭиП. – 2008. – № 08. – С. 16-24.
4. Александров Б.К. Борьба с пылью и газами в карьерах/ Б.К. Александров, Ш.Е. Чилишвили – М.: МЦМ СССР. – 1990. – 32с.

References

1. Recommendations on the technology of fixing and hydro-dusting of tailing dumps. Of VNIIBT. 1990. – 30P.
2. Vashchenko V. S., Gaiduk VP., Shuvalov R. P. Dedusting during open storage of ores //Mining journal. – 1972. No. 9. – P. 73-75.
3. Akimov A. M. Method of preventing dust formation on the surface of the tailings waste recycling hydro-metallurgical plant //Collection of scientific works SNUNP. – 2008. – № 08. – P. 16-24.
4. Alexandrov B. K. dust control in quarries and Hasami/ B. K. Alexandrov, S. E. Chelishvili – M: MCM Soviet Union. – 1990. – 32P.

УДК.550.837.3

Исследование процесса очистки воды от кремния с помощью коагуляции

А.М. Акимов, С.А. Котельникова, Е.В. Слизченко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, svetlana.83@inbox.ru

Статья поступила 22.04.2021 г.; после доработки 23.04.2021 г.

Аннотация

В результате исследования были проведены серии опытов с различным соотношением коагулянтов и флокулянта $Al_2(SO_4)_3$, определено какое соотношение является эффективным для очистки от аниона кремниевой кислоты который пагубно воздействуют на теплопередающие поверхности аппаратов и трубопроводов.

Ключевые слова: коагуляция воды, очистка, кремний, смесь коагулянтов, водоподготовка.

Investigation of the process of water purification from silicon by coagulation

A.M. Akimov, S.A. Kotelnikova, E.V. Slizchenko

Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russiae, svetlana.83@inbox.ru

Received 22.04.2021 y.; received in final form 23.04.2021 y.

Abstract

As a result of the study, a series of experiments were conducted with a different ratio of coagulants and flocculant $Al_2(SO_4)_3$, and it was determined which ratio is effective for cleaning the silicon acid anion, which adversely affects the heat transfer surfaces of apparatuses and pipelines.

Keywords: water coagulation, purification, silicon, mixture of coagulants, water treatment

Введение

При длительном нагреве воды на поверхности различных материалов образуется накипь, являющаяся результатом химических реакций с участием растворимых примесей, которые переходят в нерастворимое состояние.

Количество химических элементов, из которых образуется накипь, достаточно разнообразно и, как минимум, её классифицируют в следующие виды:

- карбонатная накипь (углекислые соли кальция и магния - $CaCO_3$, $MgCO_3$);
 - сульфатная накипь ($CaSO_4$);
 - силикатная накипь (кремнекислые соединения кальция, магния, железа, алюминия).
- Состав накипи влияет на ее прочность и степень сложности ее удаления. Наиболее легко удаляются карбонат кальция и гидроксид магния, несколько сложнее – продукты коррозии и наносные шламы, содержащие оксиды железа. Один из самых трудноудаляемых видов отложений – накипь, в состав которой входят силикаты

– соединения кремния (Рис. 1). Они являются постоянным компонентом примесей в природных водах. Обычно в поверхностных и артезианских водах общее содержание примесей кремния меняется от 1 до 30 мг/л [1].



Рис. 1. Силикатная накипь

Примеси соединений кремния, встречающиеся в воде, находятся в растворенном или коллоидном состоянии, а их основные компоненты – производные орто- (H_4SiO_4) и метакремниевой (H_2SiO_3) кислот. По степени диссоциации в воде такие соединения относятся к категории очень слабых кислот. Наиболее сильная из них – ортокремниевая кислота, которая диссоциирует по схеме:



Несмотря на низкую степень диссоциации, кремниевая кислота образует соли с кальцием, магнием, железом и алюминием – силикаты. Стоит отметить, что двух- и трехзамещенные силикаты кальция после затвердевания превращаются в очень прочный материал – присутствие подобных компонентов в накипи приводит к увеличению ее прочности и трудности удаления. Силикатная накипь образуется на наиболее теплонатяженных элементах поверхности и обладает большой твердостью и очень малой теплопроводностью; чаще всего она встречается в котлах высокого давления и даже при малой толщине очень опасна.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель работы – изучить процесс очистки воды от кремниевой кислоты. Предмет исследо-

вания – отложения кремниевой кислоты и её производных. Задачи исследования: изучить роль кремния в образовании отложений на стенках энергетического оборудования; изучить методы извлечения кремния из питательной воды.

Результаты научного исследования

Вид коллоидного состояния соединений кремния определяется их соотношением с водой. Так, если на одну молекулу двуокиси кремния в коллоидном состоянии приходится около 300 молекул воды, то образуется гель. В случае если содержание воды понижается до 30 - 40 молекул – появляется твердый продукт, образующий при нагреве хрупкое рыхлое вещество. Данное вещество, имеющее большую удельную поверхность, которая может достигать $800 \text{ м}^2/\text{г}$, обладает сильной адсорбцией к различным веществам. Эти гели поглощают различные частицы, не вступая с ними в химическое взаимодействие, и образуют прочные системы за счет своего связующего действия.

Находясь в воде в коллоидном состоянии, соединения кремния могут оседать на твердых поверхностях. На нагретых поверхностях процесс оседания и гелеобразования идет быстрее. С течением времени гель уплотняется и захватывает из водной фазы механические примеси и некоторые растворенные вещества.

При этом соединения кремния играют роль цементирующего компонента. Накипь, образованная в присутствии соединений кремния, обладает повышенной прочностью, что затрудняет ее удаление.

Кроме того, соединения кремния в воде могут принимать участие в химическом взаимодействии. Так, кремниевая кислота может взаимодействовать с катионами железа, находящимися в степени окисления +3, и быть совершенно инертной по отношению к ионам железа со степенью окисления +2.

В результате такого химического взаимодействия появляются устойчивые коллоидные образования, которые не удаляются ни фильтрованием, ни отстаиванием. Склонность кремниевой кислоты к такому химическому взаимодействию значительным образом затрудняет очистку воды от примесей железа.

Обычно удаление примесей соединения кремния не выделяют при водоподготовке в отдельную стадию, а проводят совместно с удалением других примесей, например, с процессом умягчения и последующим осаждением образо-

ванного осадка. Поэтому и реактивы, используемые для этой цели, подобны.

В ряде случаев удаление соединений кремния проводится на стадии осветления и обесцвечивания. Такие процедуры на очистных сооружениях осуществляются при коагуляции взвешенных и коллоидных соединений. Довольно часто для этих целей используют соединения алюминия или соли железа (3). Образующаяся хлопьевидная масса гидроксида алюминия или гидроксида железа захватывает частицы примесей, находящиеся в коллоидном состоянии или растворенном виде.

В результате исследования были проведены серии опытов с различным соотношением коагулянтов и флокулянта $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, определенно какое соотношение является эффективным для очистки от аниона кремниевой кислоты, который пагубно воздействуют на теплопередающие поверхности аппаратов и трубопроводов.

Природная вода в проводимом эксперименте использовалась из р. Черная, г. Севастополя, Российская Федерация.

Анализ проб реки черная в районе г. Инкерман, г. Севастополя приведены в таблице 1.

Таблица 1. Компонентный анализ р. Черная

Показатель качества	Размерность	Количество
Концентрация ионов Na^+	мг-экв/кг	1,19
Концентрация ионов Ca^{2+} , Mg^{2+}	мг-экв/кг	3,584
Концентрация ионов SiO_3^-	мг/л	0,17
Концентрация ионов HCO_3^-	мг-экв/кг	2,17
Концентрация ионов Cl^-	мг-экв/кг	1,152
Концентрация ионов SO_4^{2-}	мг-экв/кг	1,241
pH	ед.	7,868
Взвешенные вещества	мг/л	1050
Окисляемость	$\text{O}_2/\text{л}$	5,258

В процессе проведения экспериментального исследования были рассмотрены такие соотношения коагулянтов:

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = 1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 2:1, 2:3, 3:1, 3:2, 4:1;$

$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 = 1:1, 1:2.$

Определение кремне содержания проводилось фотометрическим методом с помощью молибдата аммония. Фотометрический метод определения кремнекислот основан на определении кремнемолибденового комплекса при длине

волны равной 410 нм. Данные операции были проведены для всех соотношений коагулянтов при одинаковых условиях.

Результаты экспериментов представлены на рис. 2.

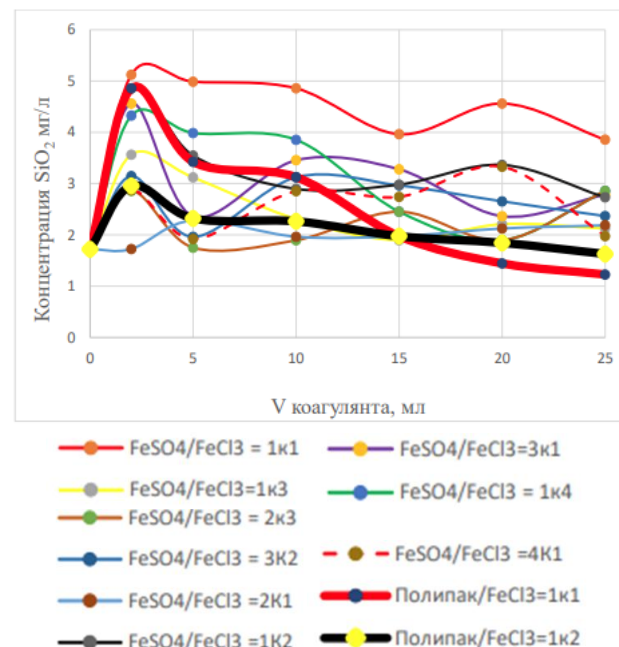


Рис.2. Обобщенная характеристика очистки воды коагулянтами в различных соотношениях.

В результате проведенных серий экспериментов следует, что смеси коагулянтов $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ в различных соотношениях не эффективны и не целесообразны для корректировки концентрации кремния в воде, так как использование коагулянтов по отдельности приводит практически к точно таким же показателям.

Однако при исследовании смеси коагулянт – флокулянт ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}:\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) в соотношениях 1:1 и 1:2 наблюдалось значительное уменьшение концентрации кремния в воде, самой минимальной концентрации удалось добиться 1,229 мг/л при соотношении 1:1. Соотношение коагулянт–флокулянт, 1:2 так же показало хорошие результаты в сравнении с со смесью коагулянтов. Минимальная концентрация была равна 1,629 мг/л при добавлении 25 мл в 100 мл исследуемой воды.

Заключение

Предварительная очистка воды по технологии коагуляции имеет ряд преимуществ и недостатков.

Преимущества:

1. Умягчение и декарбонизация воды на стадии предварительной очистки, уменьшение ионной нагрузки на натрий-катионитовые фильтры;

2. Минимальный расход сбросных вод и возможность их утилизации;

3. Отсутствие зависимости принципиального технологического решения от степени загрязнённости исходной воды взвешенными веществами;

4. Хорошие влагоотдающие свойства шлама, позволяющие при применении фильтр – прессов практически исключить образование жидких отходов на стадии предочистки

5. Эффективное удаление из воды соединений железа и коллоидной кремниевой кислоты.

Недостатки:

1. Наличие известкового хозяйства, плохо поддающегося автоматизации;

2. Зависимость эффективности оборудования от качества исходной воды;

3. Большое количество шлама;

4. Крупные габариты установки и как следствие большие размеры здания пред очистки и стоимость оборудования;

5. Необходимость ступени механической фильтрации для доочистки коагулированной воды.

Gromoglasov, A. S. Kopylov A. P., A. P. Pilshchikov: edited by O. I. Martynova. - Moscow: Energoatomizdat, 1990-272 p.

3. Semenova I. V. Industrial ecology: a textbook for students of higher educational institutions/ I. V. Semenova. - M.: Publishing center "Academy", 2009. - 528 p.

4. Kopylov A. S., Lavygin V. M., Ochok V. F. Vodopodgotovka v energetike [Electronic resource]: textbook for universities/A. S. Kopylov, V. M. Lavygin, V. F. Ochok. Moscow: MEI Publishing House, 2016. - 310 p.

Список литературы

1. Водоподготовка: Справочник. / Под редакцией д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С.Е. Беликова. М.: Акватерм, 2007. – 240 с.
2. Громогласов А.А. Водоподготовка: Процессы и аппараты: учебное пособие для вузов/ А.А. Громогласов, А.С. Копылов А.П., А.П. Пильщиков: под редакцией О.И. Мартиновой. – Москва: Энергоатомиздат, 1990 – 272 с.
3. Семенова И.В. Промышленная экология: учебное пособие для студентов высших учебных заведений/ И.В. Семенова. – М.: Издательский центр «Академия», 2009. – 528 с.
4. Копылов А.С., Лавыгин В.М., Очков В.Ф. Водоподготовка в энергетике [Электронный ресурс]: учебное пособие для вузов/А.С. Копылов, В.М.Лавыгин, В.Ф. Очков. М: Издательский дом МЭИ, 2016. – 310 с.

References

1. Water treatment: A reference book. / Edited by S. E. Belikov, Doctor of Technical Sciences, full member of the Academy of Industrial Ecology, Moscow: Aqua-Term, 2007, 240 p.
2. Gromoglasov A. A. Water treatment: Processes and apparatuses: a textbook for universities / A. A.

УДК 621.039.743

Оценка возможности применения природных сорбентов в качестве буферного материала в пунктах глубинного захоронения РАО

Т.Н. Замыслова¹, Е.А. Магдых², В.П. Волкова³^{1,2} ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия¹zamytanya@yandex.ru, ²ekaterinasevastopol@yandex.ru,³ГУПС «Водоканал», ул. Адм. Октябрьского, 4, г. Севастополь, 299011, Россия³leorena1@mail.ru

Статья поступила 15.04.2021 г.; после доработки 19.04.2021 г.

Аннотация

Приведены результаты определения сорбционных характеристик бентонита, цеолита и вермикулита. Исследованы зависимости степени сорбции ионов Ni^{2+} , I^- , Fe^{3+} рассматриваемыми природными материалами от времени протекания сорбции, концентрации и pH растворов, изучено влияние на степень сорбции знака и величины заряда поглощаемого иона. Показано, что максимальная степень сорбции при всех варьируемых факторах, а также возможность сорбировать как катионы, так и анионы наблюдается для бентонита, что делает его наиболее эффективным материалом для использования в качестве сорбционного буфера.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, природные сорбенты, пункт глубинного захоронения РАО.

Assessment of the possibility of using natural sorbents as a buffer material in deep disposal sites for RW (DDSRW)

T.N. Zamislova¹, E.A. Magdych², V.P. Volkova^{1,2}Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia¹zamytanya@yandex.ru, ²ekaterinasevastopol@yandex.ru³GUPS "Vodokanal", 4, Admiral Oktyabrsky str., Sevastopol, 299011, Russia³leorena1@mail.ru

Received 15.04.2021 y.; received in final form 19.04.2021 y.

Abstract

The results of determining the sorption characteristics of bentonite, zeolite and vermiculite are presented. The dependences of the degree of sorption of Ni^{2+} , I^- , and Fe^{3+} ions by the natural materials under consideration on the sorption time, concentration, and pH of solutions are studied, and the effect of the sign and charge value of the absorbed ion on the degree of sorption is studied. It is shown that the maximum degree of sorption under all variable factors, as well as the ability to sorb both cations and anions, is observed for bentonite, which makes it the most effective material for use as a sorption buffer.

Keywords: radioactive waste, natural sorbents, deep disposal site for RW, buffer material.

Введение

Изоляция РАО в глубоких геологических формациях в настоящее время считается наиболее приемлемым методом обращения со средне-

и высокоактивными отходами (САО, ВАО), способным минимизировать негативное воздействие на человека и объекты окружающей среды в течение периода их потенциальной опасности. Проекты пунктов захоронения существуют в целом ряде стран: Финляндии, Швеции, США,

Бельгии, Франции и т.д. [1]. Проект пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) для РАО 1 и 2 класса разрабатывается и в России [2].

Постановлением Правительства РФ от 19.11.2015 г. № 1248 утверждена федеральная целевая программа «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016-2020 годы и на период до 2030 года». В программе предусмотрено мероприятие (п. 2.1) «Строительство объекта окончательной изоляции РАО I и II классов (Нижне-Канский массив, Красноярский край)», в том числе первая очередь в виде подземной исследовательской лаборатории.

В Нижне-Канском массиве (НКМ) горных пород планируется строительство ПГЗРО на глубине около 500 м [3]. До момента передачи Национальному оператору на окончательное захоронение РАО будут находиться на временном хранении в хранилищах на АЭС.

При размещении РАО в пунктах глубинного захоронения функцию удержания выполняют инженерные барьеры безопасности, минимизирующие выход радионуклидов за пределы объекта, а функцию изоляции – природные (естественные) барьеры, ограничивающие воздействие отходов на человека и биосферу. Российский проект ПГЗРО использует кристаллический тип пород, состоящий из гранитов, диоритов и гнейсов.

К инженерным барьерам, предусмотренных проектом, относятся:

1. Матрица. РАО должны быть приведены в физический облик, приемлемый для захоронения и выполняющий критерии приемлемости. Выполнение операции для достижения такого перевода принято называть кондиционированием отходов. Для высокоактивных отходов 1 и 2 классов опасности используется технология остекловывания, для среднеактивных отходов класса 2 с радионуклидами, имеющими большой период полураспада, – цементирование. В качестве матрицы для ВАО в РФ используется алюмофосфатное стекло [4].
2. Контейнер. Преимущественно изготавливается из нержавеющей стали, а также иных сплавов на основе железа. Служит для изоляции отходов от подземных вод.
3. Буферный материал. В качестве основной роли сорбционного буфера принято считать изоляцию контейнера с РАО от биосферы благодаря значительной способности задерживать радионуклиды в СИБ и исключению

попадания подземных вод [4].

4. Засыпка. Предназначена для фиксирования контейнеров и буфера в местах их размещения, заполнения свободного пространства шахт и тоннелей. В качестве засыпки предпочтительны бентонитовые глины, дробленые вмещающие породы, их смеси с кварцем для возрастания теплопроводности, порошкообразным железом для формирования восстановительной среды, измельченным нерадиоактивным стеклом для пропитки подземных вод его элементами [5].

Можно выделить несколько основных требований к буферному материалу хранилища, исходя из которых будет осуществляться выбор наиболее подходящего сорбента в данной работе:

1. Материал должен быть безопасным: негорючим, невзрывоопасным, не приводить к летальному исходу контактирующего с ним персонала.
2. Сорбционный буфер должен быть коррозионно неактивным, не вызывать коррозию металлов самостоятельно и не способствовать ее углублению и распространению, если она уже возникла.
3. Необходимо учитывать техническую реализуемость проекта. Материал должен находиться в форме, удобной для заполнения пространства между контейнерами с РАО.
4. Буферный материал обязан соответствовать национальным нормам по обращению с РАО и всем имеющимся нормативным документам, регулирующим обращение с РАО.
5. Сорбент предпочтительно должен быть природного происхождения и обладать приемлемой стоимостью.
6. Одной из важнейших характеристик является сорбционная способность буфера, а также способность сохранять свои свойства в течение долгого времени. Желательным условием является устойчивость к агрессивным средам.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования: определение сорбционных характеристик бентонита, цеолита и вермикулита и оценка возможности их применения в качестве буферного материала в ПГЗРО.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- исследование зависимости степени сорбции

рассматриваемых сорбентов от времени протекания сорбции, концентрации и pH растворов;

- изучение влияния на степень сорбции знака и величины заряда поглощаемого иона;
- сравнение сорбентов с точки зрения применения в качестве буферного материала в ПГЗРО.

Методика проведения исследования

В качестве сорбируемых ионов были выбраны ионы Ni^{2+} , I^- , Fe^{3+} . Содержание ионов никеля (II) определяли прямым комплексометрическим титрованием [6], йодид-ионов – обратным титрованием по методу Фольгарда [7], ионов железа (III) – фотометрическим методом [8]. В ходе эксперимента были определены зависимости степени сорбции рассматриваемых ионов выбранными сорбентами от времени протекания процесса сорбции, а также от концентрации и pH растворов.

Расчет степени сорбции проводили по формуле:

$$\alpha = \frac{C_0 - C_p}{C_0} \cdot 100 \%$$

где C_0 – концентрация исследуемого иона в исходном растворе;

C_p – концентрация исследуемого иона в растворе после сорбции.

Исследование зависимости степени сорбции от времени

В химические стаканы объемом 150 мл помещали навески сорбента (по 1 г). В первый стакан добавляли 100 мл раствора иона Ni^{2+} с концентрацией 1 г/л, во второй – 100 мл раствора иона Fe^{3+} с концентрацией 1 г/л; в третий – 100 мл раствора иона I^- с концентрацией 2 г/л. Через 1, 3 и 24 часа выдержки отбирали из каждого стакана пробы, определяли содержание ионов и рассчитывали степени сорбции.

Исследование зависимости степени сорбции от концентрации раствора

В химические стаканы объемом 150 мл помещали навески сорбента (по 1 г). В пять химических стаканов добавляли по 100 мл растворов иона Ni^{2+} с концентрациями 1; 3; 6; 8; 10 г/л, в следующие пять химических стаканов – по 100 мл растворов иона Fe^{3+} с концентрациями 1; 3; 6; 8; 10 г/л, в последние пять химических ста-

канов – по 100 мл растворов иона I^- с концентрациями 1; 3; 6; 8; 10 г/л. Через 3 часа из каждого химического стакана отбирали пробы, определяли содержание ионов и рассчитывали степени сорбции.

Исследование зависимости степени сорбции от pH

В химические стаканы объемом 150 мл помещали навески сорбента (по 1 г). В пять химических стаканов добавляли по 100 мл растворов иона Ni^{2+} с концентрацией 1 г/л и с pH 2; 4; 5; 7; 8,5; 11, в следующие пять химических стаканов – по 100 мл растворов иона Fe^{3+} с концентрацией 1 г/л и с pH 2; 4; 5; 7; 8,5; 11, в последние пять химических стаканов – по 100 мл растворов иона I^- с концентрацией 2 г/л и с pH 2; 4; 5; 7; 8,5; 11. Через 3 часа из каждого химического стакана отбирали пробы, определяли содержание ионов и рассчитывали степени сорбции.

Результаты исследования зависимости степени сорбции от времени контакта сорбента с раствором

На рисунках 1-3 представлены зависимости степени сорбции ионов Ni^{2+} , I^- и Fe^{3+} исследуемыми сорбентами от времени контакта.

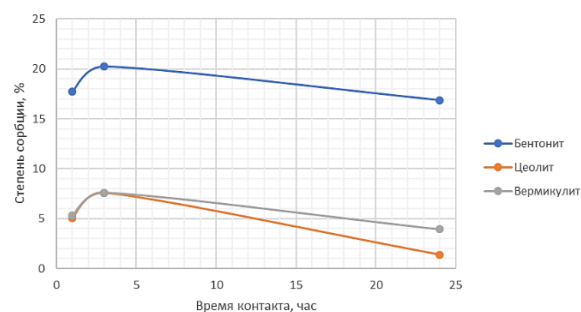


Рис. 1. Зависимость степени сорбции иона Ni^{2+} от времени контакта

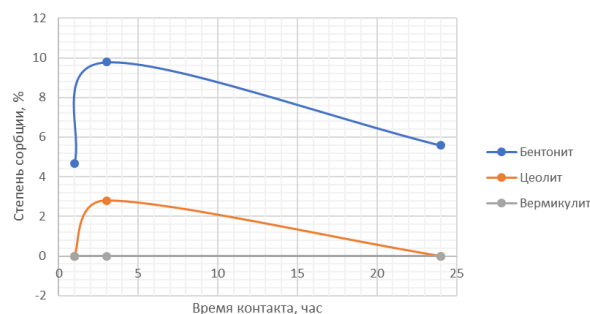


Рис. 2. Зависимость степени сорбции иона I^- от времени контакта

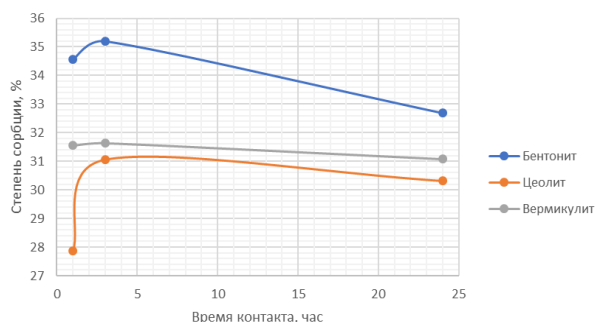


Рис. 3. Зависимость степени сорбции иона Fe^{3+} от времени контакта

Согласно полученным данным можно отметить следующее:

1. Степень сорбции иона Ni^{2+} для всех сорбентов увеличивается в начальный период выдержки (до 3 часов), в дальнейшем наблюдается процесс десорбции. Наибольшей сорбирующей способностью по отношению к никелю обладает бентонит, степени сорбции данного иона для цеолита и вермикулита практически совпадают. Данный результат обусловлен большей степенью набухаемости бентонита относительно цеолита и вермикулита, что увеличивает поверхность контакта сорбента с раствором и, соответственно, сорбционную способность.

2. Для бентонита и цеолита наблюдается возрастание степени сорбции иона I^- в промежутке от 1 до 3 часов и процесс десорбции через 24 часа исследования. Вермикулит же демонстрирует практически нулевые значения степени сорбции на всем временном интервале. Это свидетельствует о неспособности данного сорбента к поглощению анионов, что обусловлено составом и структурой вещества. Вермикулит обладает структурой, близкой к слюдяной, в связи с чем способен к сорбции лишь катионов. Сорбция аниона йода для цеолита и бентонита также значительно ниже по сравнению с никелем, что, соответственно, указывает на преимущественное их использование для сорбции катионов.

3. Степени сорбции иона Fe^{3+} для всех сорбентов значительно возрастают в сравнении с другими ионами, что позволяет выстроить ряд возрастания сорбирующей способности: $\text{I}^- > \text{Ni}^{2+} > \text{Fe}^{3+}$. Можно сделать вывод о влиянии на степень сорбции не только знака заряда, но также и величины заряда и валентности. Возрастание степени сорбции также наблюдается в промежуток с 1 до 3 часов для цеолита и бентонита, причем у цеолита она возрастает наиболее резко. Через 24 часа вновь наблюдается десорбция,

наиболее значительная для бентонита. Вермикулит сохраняет практически постоянные значения степени сорбции с незначительной десорбцией через 24 часа. Наилучшие сорбционные свойства вновь демонстрирует бентонит, по причинам, описанным выше. В связи со своим химическим составом вермикулит обладает большей способностью связывать ионы железа, чем цеолит.

Результаты исследования зависимости степени сорбции от величины pH растворов

На рисунках 4-6 приведены зависимости степени сорбции иона ионов Ni^{2+} , I^- и Fe^{3+} рассматриваемыми сорбентами от величины pH растворов:

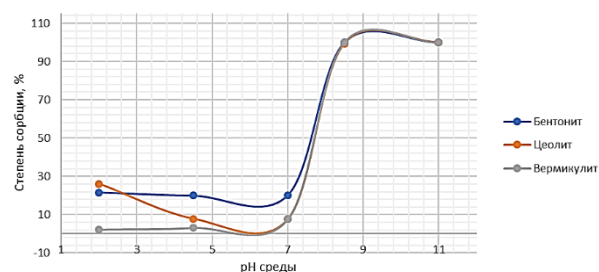


Рис. 4. Зависимость степени сорбции иона Ni^{2+} от величины pH

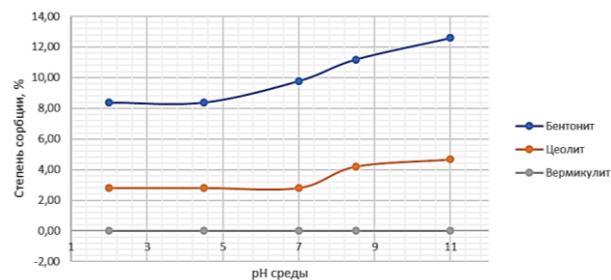


Рис. 5. Зависимость степени сорбции иона I^- от величины pH

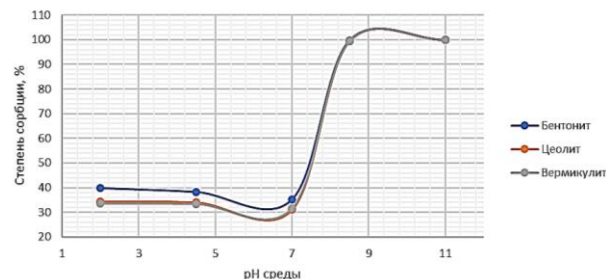


Рис. 6. Зависимость степени сорбции иона Fe^{3+} от величины pH

Согласно полученным данным можно отметить следующее:

1. Степень сорбции ионов Ni^{2+} практически не изменяется в интервале pH от 2 до 4,5 для бентонита и вермикулита, и резкое ее увеличение происходит при pH = 8,5 – 11 для всех сорбентов. Это объясняется тем, что в щелочной среде ионы никеля переходят в гидратированную форму, которая и задерживается сорбентами. В кислой среде для бентонита и вермикулита сорбционная способность к ионам никеля практически не отличается от значений для нейтральной среды, а у цеолита при pH = 2 наблюдается сильное возрастание степени сорбции, превышающее даже аналогичное значение бентонита, что происходит вследствие большей устойчивости цеолита к агрессивным средам.

2. Для бентонита и цеолита степень сорбции йодид-ионов увеличивается в интервале pH от 7 до 11, что объясняется слабой диссоциацией сорбентов в щелочной среде, приводящей к выделению небольших количеств положительно заряженных ионов, связывающих анионы йода. В кислой среде значения степени сорбции остаются неизменными. Сорбционная способность вермикулита остается практически нулевой на всем интервале величин pH.

3. Для всех трех сорбентов значения степени сорбции железа в интервале pH от 2 до 4,5 остаются практически неизменными, при pH = 7 незначительно падают, а при pH = 8,5 – 11 приближаются к 100, благодаря гидратации ионов железа в щелочной среде, аналогично ионам никеля.

Результаты исследования зависимости степени сорбции от концентрации растворов

На рисунках 7-9 приведены зависимости степени сорбции ионов Ni^{2+} , I^- и Fe^{3+} рассматриваемыми сорбентами от концентрации раствора.

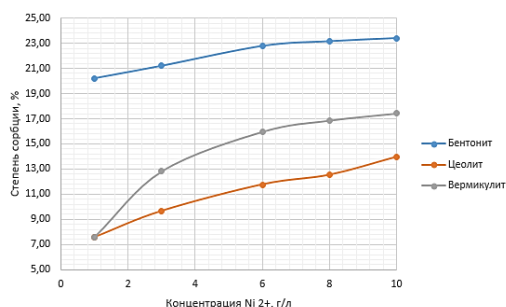


Рис. 7. Зависимость степени сорбции иона Ni^{2+} от концентрации раствора

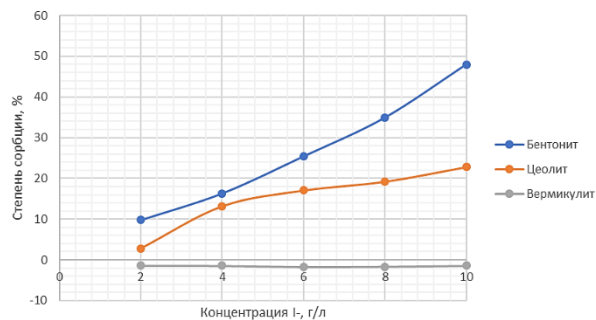


Рис. 8. Зависимость степени сорбции иона I^- от концентрации раствора

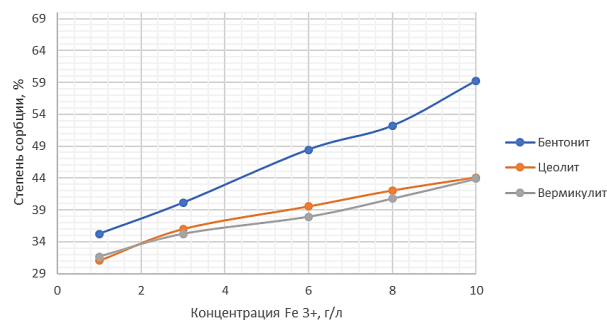


Рис. 9. Зависимость степени сорбции иона Fe^{3+} от концентрации раствора

Согласно полученным данным можно отметить следующее:

1. С увеличением концентрации степень сорбции иона Ni^{2+} возрастает для всех сорбентов. Наибольшие значения вновь наблюдаются для бентонита в связи с его большей набухаемостью. В интервале концентраций от 3 г/л до 10 г/л степень сорбции вермикулитом превышает аналогичные значения цеолита, что демонстрирует преобладание слоистой структуры при сорбции ионов никеля, чего невозможно было заметить при измерении без варьирования концентрации раствора.

2. Степени сорбции иона I^- бентонитом и цеолитом также увеличиваются с возрастанием концентрации раствора, что говорит о возможности этих двух сорбентов поглощать анионы, но лишь при больших концентрациях. Степень сорбции иона I^- вермикулитом на всем интервале концентраций остается практически неизменной и находится в области отрицательных значений, демонстрируя полное отсутствие способности сорбировать анионы, что по-прежнему может быть объяснено его слоистой структурой.

3. Степени сорбции иона Ni^{2+} для всех сорбентов возрастает с увеличением концентрации раствора. Наибольшую степень сорбции вновь

демонстрирует бентонит, а значения для цеолита и вермикулита практически совпадают на всем интервале изменения концентраций.

Заключение

1. Цеолит и вермикулит продемонстрировали приемлемые значения степени сорбции, однако уступающие бентониту в аналогичных условиях. Вермикулит обнаружил свою непригодность в качестве сорбирующего материала в случаях, когда необходимо поглощение анионов, что исключает его из списка наиболее подходящих сорбентов для целей ПЗРО, так как в состав РАО входят изотопы йода.

2. Все сорбенты пригодны к использованию как в щелочной, так и в кислой среде, и демонстрируют улучшение сорбционных характеристик с возрастанием концентраций растворов, что может быть полезно в случаях резких повреждений упаковок РАО и выхода большого количества радионуклидов в объем буферного материала.

3. Все рассмотренные сорбенты являются природными материалами, что является их преимуществом с экономической точки зрения, так как значительно уменьшает стоимость закупки по сравнению с синтезированными материалами.

4. Для использования в качестве сорбционного буфера наиболее приемлемым является бентонит, так как его степень сорбции при всех варьируемых факторах остается наибольшей, а также из-за его способности к увеличению объема при контакте с влагой, что особенно важно для материала, заполняющего пространство между контейнерами с РАО, поскольку набухший бентонит будет препятствовать дальнейшему распространению радионуклидов по объему хранилища.

Список литературы

1. Цебаковская Н.С. и др. Обзор зарубежных практик захоронения ОЯТ и РАО. М.: Издательство «Комтехпринт», 2015. 208 с.
2. Подземная исследовательская лаборатория в Нижне-Канском массиве [электронный ресурс] / URL: <http://www.norao.ru/about/underground/>
3. Дробышевский Н. И., Моисеенко Е.В., Бутов Р.А., Токарев Ю.Н. Трехмерное численное моделирование теплового состояния пункта глубинного захоронения радиоактивных отходов в Нижне-Канском массиве горных пород / Радиоактивные отходы. №1, 2017. С. 65-74.
4. Кочкин Б.Т., Мальковский В.И., Юдинцев С.В.

Научные основы оценки безопасности геологической изоляции долгоживущих радиоактивных отходов (Енисейский проект). М.: ИГЕМ РАН, 2017. 384 с.

5. МАГАТЭ. Захоронение радиоактивных отходов. Конкретные требования безопасности, № SSR-5 // Вена: МАГАТЭ, 2011. 104 с.
6. ГОСТ 10398-76 Реактивы и особо чистые вещества. Комплексометрический метод определения содержания основного вещества (с Изменениями N 1, 2, 3). М.: Стандартиформ, 2008 г.
7. Коростелев П.П. Титриметрический и гравиметрический анализ в металлургии. Глава 2. Методы осаждения. М.: Металлургия, 1985 г. 320 с.
8. ГОСТ 4011-72 Вода питьевая. Методы измерения массовой концентрации общего железа. М.: Стандартиформ, 2010 г.

References

1. Tsebakovskaya N. S. etc. *Obzor zarubezhnyh praktik zahoroneniya OYAT i RAO* [Review of foreign practices of SNF and RW disposal]. М.: Publishing house "Komtechprint", 2015. 208 p.
2. *Podzemnaya issledovatel'skaya laboratoriya v Nizhne-Kanskom massive* [Underground research laboratory in the Nizhne-Kansk massif] [electronic resource] / URL: <http://www.norao.ru/about/underground>
3. Drobyshevsky N. I., Moiseenko E. V., Butov R. A., Tokarev Yu. N. *Trekhmernoe chislennoe modelirovanie teplovogo sostoyaniya punkta glubinnogo zahoroneniya radioaktivnyh othodov v Nizhne-Kanskom massive gornyh porod* [Three-dimensional numerical simulation of the thermal state of the deep disposal site for radioactive waste in the Nizhne-Kansk rock mass] / *Radioactive Waste*. №1, 2017. P. 65-74.
4. Kochkin B. T., Malkovsky V. I., Yudintsev S. V. *Nauchnye osnovy ocenki bezopasnosti geologicheskoy izolyacii dolgozhivushchih radioaktivnyh othodov (Enisejskij projekt)* [Scientific basis for safety evaluation of geological isolation of long-lived radioactive waste (Yenisei project)]. М.: IGEM RAS, 2017. 384 p.
5. MAGATE. *Zahoronenie radioaktivnyh othodov. Konkretnye trebovaniya bezopasnosti* [IAEA. Disposal of radioactive waste. Specific safety requirements], No. SSR-5 // Vienna: IAEA, 2011. 104 p.
6. *GOST 10398-76 Reaktivy i osobo chistye veshchestva. Kompleksonometricheskij metod opredeleniya soderzhaniya osnovnogo veshchestva (s Izmeneniyami N 1, 2, 3)* [GOST 10398-76 Reagents and especially pure substances. Complexometric method for determining the content of the main substance (with Changes N 1, 2, 3)]. М.: Standartinform, 2008
7. Korostelev P. P. *Titrimetricheskij i gravimetricheskij analiz v metallurgii. Glava 2. Metody osazhdeniya* [Titrimetric and gravimetric analysis in

- metallurgy. Chapter 2. Deposition methods]. M.: Metallurgy, 1985, 320 p.
8. *GOST 4011-72 Voda pit'evaya. Metody izmereniya massovoj koncentracii obshchego zheleza* [GOST 4011-72 Drinking water. Methods for measuring the mass concentration of total iron]. M.: Standartinform, 2010

УДК 620.3

Анализ структур математических моделей исследования сорбционных свойств термически модифицированных сорбентов кварца, цеолита и шунгита при сорбции Cu^{2+}

Федорова С.А., Магдыч Е.А.

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. s.a.fedorova@sevsu.ru, EAMacduch@sevsu.ru

Статья поступила 22.04.2021 г.; после доработки 26.04.2021 г.

Аннотация

Проведен анализ структур математических моделей, описывающий процесс сорбции Cu^{2+} , определены коэффициенты детерминации, для рассматриваемых структур, проанализированы накопительные диаграммы процессов сорбции Cu^{2+} термически модифицированными сорбентами – кварцем, цеолитом и шунгитом.

Ключевые слова: сорбция, медь (II), структура математической модели, цеолит, шунгит, кварц.

Analysis of the structures of mathematical models for studying the sorption properties of thermally modified sorbents of quartz, zeolite and shungite during the sorption of Cu^{2+}

Fedorova S.A., Magdych E.A.

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
s.a.fedorova@sevsu.ru, EAMacduch@sevsu.ru

Received 22.04.2021 y.; received in final form 26.04.2021 y.

Abstract

The analysis of the structures of mathematical models describing the process of sorption of Cu^{2+} was carried out, the coefficients of determination were determined, for the structures under consideration, cumulative diagrams of the processes of sorption of Cu^{2+} by thermally modified sorbents - quartz, zeolite and shungite - were analyzed.

Keywords: sorption, copper (P), the structure of the mathematical model, zeolite, shungite, quartz.

Введение

Стоки горно-обогатительной промышленности и шахтные воды горнодобывающей медной промышленности, гальванические цехи и участки, имеющиеся почти на всех машиностроительных и приборостроительных предприятиях, являются основными источниками загрязнения сточных вод ионами меди.

В сточных водах промышленных предприятий, например, гальванических производств, медь присутствует как в ионном виде, так и в

виде различных комплексных соединений – сульфатных, фторидных, хлористых, аммиачных, цианидных. Необходимость удаления ионов меди из стоков промышленных предприятий диктуется не только ее токсическим действием, но и ценностью выделяемого сырья [1].

При попадании ионов меди в водоемы у многих низших организмов нарушается нормальное развитие уже при концентрации от 0,01 до 0,1 мг/л, а гибель иногда отмечалась при концентрации 0,02 мг/л. Попадая в организм человека ионы меди и никеля могут поражать

печень, почки и желудочно-кишечный тракт [2].

Содержание ионов меди в попутных рудничных водах сравнимо с ее концентрацией в гидроминеральном сырье. Т.е., концентрация, достаточная для извлечения медного сырья [1].

Так, при производстве печатных плат во время приготовления и использования медно-аммиачных травильных растворов доля меди в высушенном шламе достигает 40–47 %. Купрозан – сельскохозяйственный ядохимикат, в своей основе содержит порядка 65% гидроксихлорида меди. Просроченные ядохимикаты централизованно собираются и подвергаются высокотемпературной деструкции на специальных полигонах. Медь (и другие металлы) при этом безвозвратно теряются.

В промышленности для осаждения ионов меди из стоков, как правило, применяются цементация или электролиз. При высоком содержании ионов меди используют электроосаждение. Этим способом получают медь высокой чистоты и регенерируется серная кислота, при этом возможна организация замкнутого цикла. Если содержание ионов меди менее 15 г/л, то целесообразно применять метод цементации железом. Для проведения метода цементации железом при извлечении ионов меди целесообразно использовать мелко раздробленные металлы.

По степени активности железосодержащие осадители в процессе цементации ионов меди можно расположить следующим образом: 1) жестяной скрап (без олова); 2) губчатое железо; 3) тонколистовое железо; 4) серый чугу́н; 5) сталь; 6) белый чугу́н. Ковкое и губчатое железо дают крупный осадок меди, серый чугу́н – рыхлый и губчатый, а белый чугу́н и сталь дают наиболее плотный осадок. На практике чаще всего применяют железный скрап и серый чугу́н. Недостаток метода по извлечению ионов меди из шлаковых систем цементацией чугу́ном состоит в низкой производительности и недостаточной эффективности процесса (извлечение меди не превышает 60 %). Осаждение ионов меди железным скрапом более эффективно, однако скрап необходимо тщательно сортировать и подготавливать. Процесс ведут при температуре 50–100° С. При этом получают осадок с содержанием меди в порошке порядка 90%. Извлечение ионов меди, никеля и кобальта при цементации их в расплавах при повышенной температуре (до 900–1200 °С) может быть увеличена до 96–98 %. Однако, при этом возрастают технические и энергетические затраты [3].

Экстракционная технология характеризуется высокой избирательностью по отношению к

извлекаемому металлу, что позволяет снизить затраты химических реагентов и время технологического цикла. Экстракционная технология получения меди сложнее цементации меди железным скрапом, но в результате ее применения получается сразу катодная медь, в оборотных растворах не накапливается железо, регенерируется серная кислота. Это позволяет экономить на каждом килограмме меди до полутора килограмм кислоты [4].

Сорбционная очистка сточных и технологических вод от ионов меди является, на наш взгляд, перспективной с точки зрения минимизации затрат на организацию и проведение непрерывного процесса. В качестве сорбентов для очистки сточных вод от ионов меди применяются: активированный уголь; кварцево-глауконитовый песок с содержанием глауконита 60-80%; композиционный сорбент на основе катионита КУ-2х8 и гидроксида железа (III); доломит; алюмосиликаты; отходы углеродных перевязочных материалов; волокнистые карбоксильные иониты [5].

Цели и задачи исследования

Величины сорбции зависят от физико-химических свойств системы сорбат – сорбент. В нашей работе мы анализировали математическое описание сорбции Cu^{2+} природными сорбентами – кварцем, шунгитом и цеолитом, которые модифицированы при различных температурах: 200°, 400° и 600°С. Цель исследования – сравнить структуры математических моделей, описывающих сорбционные свойства кварца, шунгита и цеолита, подвергшихся термической обработке, на степень очистки модельного раствора от Cu^{2+} .

Обсуждение результатов

Эксперимент заключается в исследовании изменений концентрации Cu^{2+} в растворах при динамической сорбции. В качестве сорбентов использовались шунгит, цеолит и белый кварц. Каждый из них подвергался прокаливанию в муфельной печи при температурах 200°С, 400°С и 600°С в течение трёх часов. Определение изменения концентрации Cu^{2+} в растворе в результате его очистки сорбционным методом.

Готовили термически модифицированные сорбенты шунгита, цеолита и белого кварца при температурах 200°С, при 400°С и при 600°С. В мерный стакан, содержащий 100 мл модельного раствора Cu^{2+} , добавляли 5 г навески исследуемого сорбента. В качестве контрольной пробы

использовали немодифицированные сорбенты. Содержимое стакана перемешивают магнитной мешалкой. Каждые 5 минут отбирали пипеткой аликвоту 5 мл и переносили ее в воронку с фильтровальной бумагой. Очищенную аликвоту модельного раствора меди (II) переносили в колбу на 100 мл и измеряли оптическую плотность фотометрическим методом.

Результаты исследования представлены в работе Федоровой С.А., Магдыч Е.А., Кравчук А.А., Ведищевой О.В. «Очистка сточных вод от ионов меди (II) модифицированными природными сорбентами» [6].

В качестве анализируемых структур были выбраны: экспоненциальная, линейная, логарифмическая, степенная и полиномиальные от 2-го до 6-го порядка. Для каждой зависимости определен коэффициент детерминации.

С целью определения вклада каждого температурного режима в суммарный эффект сорбционной способности кварцевого сорбента не модифицированного (медь) и термически обработанного при различных температурах (200, 400, 400) была построена диаграмма изменения сорбционной способности кварцевого сорбента с различной температурой термообработки по сорбции Cu^{2+} , представленная на рис.1.

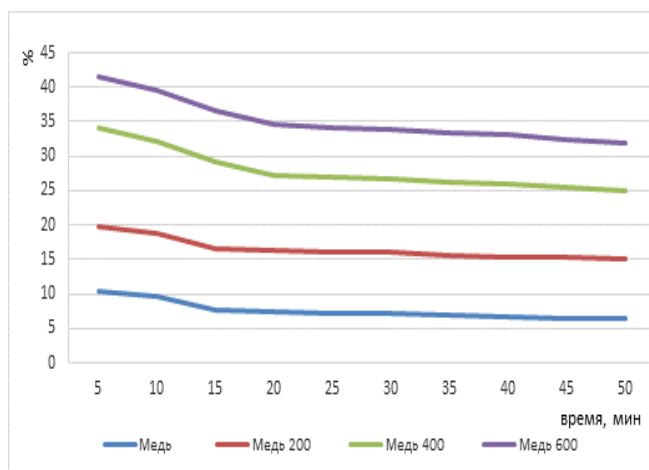


Рис.1. Накопительная диаграмма изменения сорбционной способности меди на кварцевом сорбенте с различной температурой термообработки

По данным, полученным в результате сорбционной очистки раствора Cu^{2+} с использованием термически модифицированных сорбентов в [6], были рассчитаны параметры различных структур математических моделей и определены коэффициенты детерминации. Полученные значения приведены в таблице 1, где 0 – не модифицированный сорбент; 200 – сорбент, модифици-

рованный при 200⁰С; 400 – сорбент, модифицированный при 400⁰С; 600 – сорбент, модифицированный при 600⁰С.

Наименьшее значение коэффициента детерминации получено для линейной структуры базового сорбента, термически необработанного (0,8063), обработанного при 200⁰С (0,8255), обработанного при 400⁰С (0,8381) и обработанного при 600⁰С (0,8577).

Таблица 1. Коэффициенты детерминации для различных структур математических моделей процесса сорбции Cu^{2+} на различных видах кварцевых сорбентов

Структура математической модели	600	400	200	0
экспонента	0,8577	0,8381	0,8255	0,8063
линейная	0,8351	0,8114	0,8001	0,7605
логарифмическая	0,9702	0,9625	0,949	0,9340
полином 2	0,9599	0,9551	0,9377	0,9299
полином 3	0,9877	0,9869	0,9675	0,9675
полином 4	0,9885	0,9877	0,9682	0,9681
полином 5	0,9973	0,9969	0,9744	0,9756
полином 6	0,9992	0,9991	0,9899	0,9891
степенная	0,9739	0,9683	0,9562	0,9502

Наиболее достоверные данные получены при использовании полинома 6-го порядка: для базового сорбента, термически необработанного (0,9891), обработанного при 200⁰С (0,9899), обработанного при 400⁰С (0,9991) и обработанного при 600⁰С (0,9992). Степенная структура приближена по значениям к полиномам 2-го и 3-го порядков. Логарифмическая структура близка по значениям коэффициента детерминации к полиному 3-го порядка. Таким образом, можно принять, что процесс сорбции меди на термически не модифицированном кварцевом сорбенте описывается уравнением (1), термически модифицированном при 200⁰С (2), обработанного при 400⁰С (2) и обработанного при 600⁰С (4).

$$y = -8 \cdot 10^{-6} \cdot x^6 + 0,0003 \cdot x^5 - 0,0039 \cdot x^4 + 0,0258 \cdot x^3 - 0,0828 \cdot x^2 + 0,1083 \cdot x + 0,0575 \quad (1)$$

$$y = -1 \cdot 10^{-5} \cdot x^6 + 0,0004 \cdot x^5 - 0,0048 \cdot x^4 + 0,0311 \cdot x^3 - 0,0996 \cdot x^2 + 0,1317 \cdot x + 0,1387 \quad (2)$$

$$y = -8 \cdot 10^{-6} \cdot x^6 + 0,0003 \cdot x^5 - 0,0041 \cdot x^4 + 0,0288 \cdot x^3 - 0,0988 \cdot x^2 + 0,1276 \cdot x + 0,2873 \quad (3)$$

$$y = -7 \cdot 10^{-6} \cdot x^6 + 0,0003 \cdot x^5 - 0,0041 \cdot x^4 + 0,0289 \cdot x^3 - 0,0998 \cdot x^2 + 0,1294 \cdot x + 0,3616 \quad (4)$$

В приведенных уравнениях заметные отличия наблюдаются только в свободном члене.

При определении соотношений значений,

полученных при использовании различных структур математических моделей на временном интервале в 50 минут проведения процесса сорбции ионов меди на различных типах кварцевого сорбента получены устойчивые характеристики, приведенные в таблице 2.

Таблица 2. Таблица соотношений значений, полученных при использовании различных структур математических моделей на временном интервале в 50 минут для различных видов кварцевого сорбента

Структура математической модели	200/6	400/6	600/6	400/200	600/200	400/600
экспонента	0,8141	0,4732	0,2456	0,5813	0,3016	0,5189
линейная	0,8092	0,2391	0,2384	0,2955	0,2946	0,9971
логарифмическая	1,5644	2,61	3,0798	1,6685	1,9687	1,1800
полином 2	0,8202	0,4681	0,2522	0,5707	0,3075	0,5388
полином 3	0,8253	0,4651	0,2576	0,5636	0,3121	0,5538
полином 4	0,8253	0,4773	0,266	0,5784	0,3223	0,5572
полином 5	0,8256	0,2498	0,4641	0,3026	0,5622	1,8581
полином 6	0,8244	0,4537	0,2328	0,5504	0,2824	0,5131
степенная	0,8645	0,5484	0,2693	0,6344	0,3115	0,4911
среднее	0,9081	0,6649	0,5895	0,6383	0,5181	0,8009

Исследуя полученные характеристики, можно отметить, что использование линейной, логарифмической, степенной структур и полинома 5-го порядка и структур существенно (более 10%) отличается от среднего значения.

Т.е., наилучшим образом описывают изменение процесса сорбции при использовании термически модифицированного кварца полиномиальные структуры 2-4 и 6-го порядков. Сопоставляя эти характеристики получаем устойчивые соотношения изменения концентрации ионов меди при использовании различных термически модифицированных сорбентов. Значения приведены в таблице 3.

Так, при использовании кварца, модифицированного при 600⁰С, по сравнению с модификацией при 400⁰С концентрация Cu^{2+} изменяется на 12,74%, а по сравнению с модификацией при 200⁰С – на 25,07%.

Вклад в сорбционную способность кварца при сорбции Cu^{2+} в расчете на максимальную (полученную при термической модификации 600⁰С) приведен на рисунке 2.

По такому же принципу были рассмотрены процессы сорбции ионов меди на термически

модифицированных сорбентах шунгите и цеолите.

Наименьшее значение коэффициента детерминации получено для степенной структуры базового сорбента, термически обработанного сорбента при 200⁰С (0,8155), обработанного при 400⁰С (0,8474), обработанного при 600⁰С (0,8750) и термически необработанного (0,9098).

Таблица 3. Таблица устойчивых соотношений значений, полученных при использовании различных структур математических моделей на временном интервале в 50 минут для различных видов кварцевого сорбента

Структура математической модели	200/6	400/6	600/6	400/200	600/200	400/600
экспонента	0,8141	0,4732	0,2456	0,5813	0,3016	0,5189
полином 2	0,8202	0,4681	0,2522	0,5707	0,3075	0,5388
полином 3	0,8253	0,4651	0,2576	0,5636	0,3121	0,5538
полином 4	0,8253	0,4773	0,266	0,5784	0,3223	0,5572
полином 6	0,8244	0,4537	0,2328	0,5504	0,2824	0,5131
среднее	0,8219	0,4675	0,2508	0,5689	0,3052	0,5364

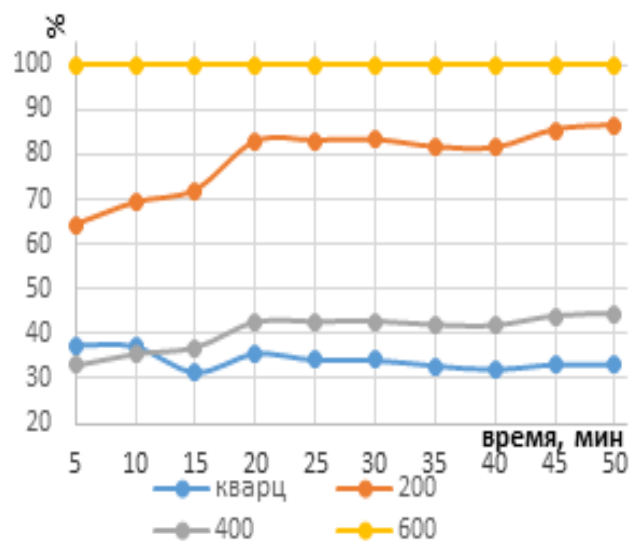


Рис.2. Вклад в сорбционную способность кварца различных термических модификаций

Наиболее достоверные данные получены при использовании полинома 6-го порядка: для базового сорбента, термически необработанного (0,9927), обработанного при 200⁰С (0,9949), обработанного при 400⁰С (0,997) и обработанного при 600⁰С (0,9927).

Таблица 4. Коэффициенты детерминации для различных структур математических моделей процесса сорбции Cu^{2+} на различных видах цеолита

Структура математической модели	600	400	200	0
экспонента	0,9859	0,9807	0,9694	0,9825
линейная	0,9899	0,9878	0,9843	0,9695
логарифмическая	0,9027	0,8764	0,8618	0,9329
полином 2	0,9901	0,9902	0,9894	0,9842
полином 3	0,9963	0,9933	0,9919	0,9845
полином 4	0,9963	0,9936	0,9919	0,9926
полином 5	0,5876	0,9964	0,9940	0,9926
полином 6	0,9927	0,997	0,9949	0,9927
степенная	0,875	0,8474	0,8155	0,9098

Значения коэффициентов детерминации полиномов 3-го и 4-го порядка отличаются незначительно, менее 5%. Процесс сорбции меди на термически не модифицированном цеолитовом сорбенте описывается уравнением (5), термически модифицированном при 200°C (6), обработанного при 400°C (6) и обработанного при 600°C (8).

$$y = 5 \cdot 10^{-6} \cdot x^6 - 0,0017 \cdot x^5 + 0,0198 \cdot x^4 - 0,0946 \cdot x^3 + 0,1347 \cdot x^2 - 0,1934 \cdot x + 6,5074 \quad (5)$$

$$y = 0,0003 \cdot x^6 - 0,0078 \cdot x^5 + 0,0888 \cdot x^4 - 0,475 \cdot x^3 + 1,2361 \cdot x^2 - 1,9352 \cdot x + 13,892 \quad (6)$$

$$y = 0,0003 \cdot x^6 - 0,0079 \cdot x^5 + 0,0832 \cdot x^4 - 0,3927 \cdot x^3 + 0,8066 \cdot x^2 - 1,2327 \cdot x + 24,272 \quad (7)$$

$$y = 5 \cdot 10^{-5} \cdot x^6 - 0,0017 \cdot x^5 + 0,0198 \cdot x^4 - 0,0946 \cdot x^3 + 0,1347 \cdot x^2 - 0,1934 \cdot x + 6,5074 \quad (8)$$

При определении соотношений значений, полученных при использовании различных структур математических моделей на временном интервале в 50 минут проведения процесса сорбции ионов меди на различных типах цеолитового сорбента получены устойчивые характеристики, приведенные в таблице 5.

Вклад в сорбционную способность цеолита при сорбции ионов меди в расчете на максимальную (полученную при термической модификации 600°C) приведен на рисунке 3.

Исследуя подобным образом структуры математических моделей и коэффициенты детерминации шунгитового сорбента, получены характеристики, идентичные цеолитовому сорбенту. Т.е., кинетические процессы имеют в основе аналогичные механизмы. Однако накопительная диаграмма показывает ярко выраженный линейный вклад в сорбционную способ-

ность термически модифицированных сорбентов (рис.4.).

Таблица 5. Таблица устойчивых соотношений значений, полученных при использовании различных структур математических моделей при описании процесса сорбции Cu^{2+} на цеолитовых сорбентах на временном интервале в 35 минут

Структура математической модели	200/6	400/6	600/6	400/200	600/200	400/600
экспонента	2,0275	3,6042	4,4492	1,7776	2,1944	1,2345
линейная	2,0361	3,6762	4,5454	1,8055	2,2324	1,2364
полином 6	2,0951	3,6935	0,9937	1,7629	0,4743	0,269
среднее	2,0529	3,6579	3,3294	1,782	1,6337	0,9133

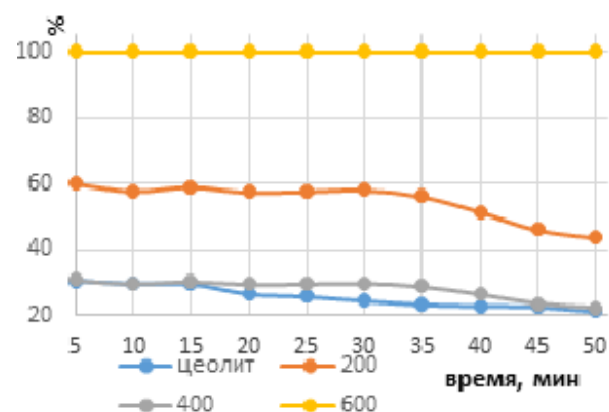


Рис.3. Вклад в сорбционную способность цеолита различных термических модификаций

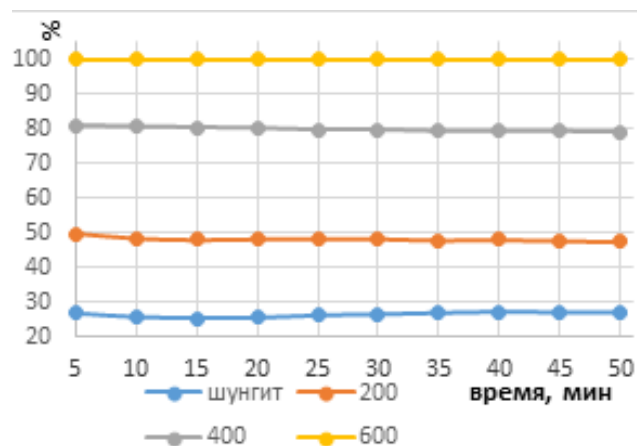


Рис.4. Вклад в сорбционную способность шунгита различных термических модификаций

Как следует из графика, линейная характеристика накопительной диаграммы предполагает отсутствие образования промежуточных соединений, влияющих на процесс сорбции ионов

меди.

Заключение

В результате проведенного исследования сорбции Cu^{2+} изучен эффект накопительного признака при термической модификации кварца, цеолита и шунгита.

Отмечено, что максимальные коэффициенты детерминации характерны для полиномиальных структур 6-го порядка математических моделей сорбции Cu^{2+} на кварце, цеолите и шунгите, модифицированных при температурах 200°C, 400°C и 600°C.

Полученные уравнения для описания процессов сорбции Cu^{2+} на модифицированных сорбентах цеолита и шунгита свидетельствуют об аналогичных процессах, протекающих на различных этапах термической модификации исследуемых сорбентов.

Анализ накопительных диаграмм показал прямую линейную зависимость изменения сорбционных свойств модифицированных сорбентов шунгита от температуры на интервале 200 – 600°C.

Список литературы

1. Медь в сточных водах /Nomitech https://nomitech.ru/articles-and-blog/med_v_stochnykh_vodakh/ (Дата обращения 21.12.2020 г.)
2. Луценко м.м. совершенствование технологии очистки стоков гальванических производств от ионов меди и никеля / диссер., 2004. – 212с. <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-tekhnologii-ochistki-stokov-galvanicheskikh-proizvodstv-ot-ionov-medi-i-n> (дата обращения: 22.12.2020 г.)
3. Миронов В. А., Шишкин А.Ю., Трейс Ю.К., Поляков А.А. Извлечение меди из водных растворов с использованием железных порошковых материалов / Промышленная и аграрная экология Industrial and Agricultural Ecology – С.97-102. <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/208308/1/97-102.pdf> (Дата обращения: 24.12.2020 г.)
4. Яковлева В.Н. Экстракционное извлечение меди из многокомпонентных растворов. /Диссер. – 2007. – 153с. <https://www.dissercat.com/content/ekstraktsionnoe-izvlechenie-medi-iz-mnogokomponentnykh-rastvorov> (Дата обращения: 24.12.2020 г.)
5. Вигдорович В.И., Цыганкова Л.Е., Николенко Д.В., Протасов А.С. Сорбционная очистка проточных растворов от меди (II) концентратом глауконита ГБМТО / Сорбционные и хроматографические процессы. 2013. Т. 13. Вып. 4. С.442-448. <http://www.sorpchrom.vsu.ru/articles/20130403.pdf>

f (Дата обращения: 24.12.2020 г.)

6. Федорова С.А., Магдых Е.А., Кравчук А.А., Ведищева О.В. Очистка сточных вод от ионов меди (II) модифицированными природными сорбентами // Естественные и технические науки. 2020. - №10 (148) - С.158 - 161.

References

1. Med v stochnykh vodakh /Nomitech https://nomitech.ru/articles-and-blog/med_v_stochnykh_vodakh/ (Data obrashcheniya: 21.12.2020 g.)
2. Lutsenko M.M. Sovershenstvovanie tekhnologii ochistki stokov galvanicheskikh proizvodstv ot ionov medi i nikelya / disser., 2004. – 212s. <https://www.dissercat.com/content/sovershenstvovanie-tekhnologii-ochistki-stokov-galvanicheskikh-proizvodstv-ot-ionov-medi-i-n> (Data obrashcheniya: 22.12.2020 g.)
3. Mironov V. A., Shishkin A.Yu., Trejs Yu.K., Polyakov A.A. Izvlechenie medi iz vodnykh rastvorov s ispolzovaniem zheleznykh poroshkovykh materialov / Promyshlennaya i agrarnaya ekologiya Industrial and Agricultural Ecology – S.97-102. <https://elib.bsu.by/bitstream/123456789/208308/1/97-102.pdf> (Data obrashcheniya: 24.12.2020 g.)
4. Yakovleva V.N. Ekstraktsionnoe izvlechenie medi iz mnogokomponentnykh rastvorov. /Disser. – 2007. – 153s. <https://www.dissercat.com/content/ekstraktsionnoe-izvlechenie-medi-iz-mnogokomponentnykh-rastvorov> (Data obrashcheniya: 24.12.2020 g.)
5. Vigdorovich V.I., Tsygankova L.E., Nikolenko D.V., Protasov A.S. Sorbtionnaya ochistka protoknykh rastvorov ot medi (II) kontsentratom glaukonita GBMTO / Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy. 2013. T. 13. Vyp. 4. S.442-448. <http://www.sorpchrom.vsu.ru/articles/20130403.pdf> (Data obrashcheniya: 24.12.2020 g.)
6. Fedorova S.A., Magdych E.A., Kravchuk A.A., Vedischeva O.V. Ochistka stochnykh vod ot ionov medi (II) modifitsirovannymi prirodnyimi sorbentami / Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2020. - №10 (148) - S.158 - 161.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 504.455

Оценка токсичности воды Кадыковского карьера

Е.В. Заблоцкая, Г.В. Кучерик, Н.М. Дербасова, Т.Н. Тищенко, А.С. Горблянская
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, Galina_kucherik@mail.ru

Статья поступила 16.04.2021 г.; после доработки 20.04.2021 г.

Аннотация

Работа посвящена определению токсичности вод Кадыковского карьера. Оценка проводилась методом биотестирования, позволяющим определить интегральной токсичности воды водоема. В качестве тест-объектов были использованы рачки дафний (*Daphnia magna* Straus) и микроводоросли (*Chlorella vulgaris* Beijer). За окончательный результат принято значение, выявленное на тест-объекте, проявившем более высокую чувствительность (*Chlorella vulgaris* Beijer). Подтверждена безопасность использования вод озера в хозяйственно-питьевых целях при условии разбавления с водами реки Чёрная более, чем 3 раз.

Ключевые слова: биотестирование, дафнии, Кадыковский карьер, оценка токсичности, хлорелла.

Assessment of the toxicity of water in the Kadykovsky quarry

E.V. Zablozkaya, G.V. Kucherik, N.M. Derbasova, T.N. Tischenko,
A.S. Gorblyanskaya
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
Galina_kucherik@mail.ru

Received 16.04.2021 y.; received in final form 20.04.2021 y.

Abstract

The work is devoted to the determination of the toxicity of the waters of Kadykovsky quarry. The assessment was carried out by the method of biotesting, which makes it possible to determine the integral toxicity of the water in the reservoir. *Daphnia* crustaceans (*Daphnia magna* Straus) and microalgae (*Chlorella vulgaris* Beijer) were used as test objects. The final result is taken as the value found on the test object that showed a higher sensitivity (*Chlorella vulgaris* Beijer). The safety of the use of lake waters for household and drinking purposes has been confirmed, provided that it is diluted with the waters of the Chernaya River more than 3 times.

Keywords: biotesting, daphnia, Kadykovsky quarry, toxicity assessment, chlorella.

Введение

Крым хронически испытывает проблемы с водой. Связано это с географическими особенностями региона, а с недавних пор и с политическими причинами.

Украина обеспечивала до 85% потребностей Крыма и Севастополя в пресной воде через Северо-Крымский канал, соединяющий главное

русло Днепра с полуостровом. После присоединения Крыма к России в 2014 году поставки воды на полуостров со стороны Украины были прекращены. Сегодня запасы воды в Крыму пополняют из водохранилищ естественного стока и подземных источников. В 2020 году ситуация с водоснабжением в Севастополе стала критической [1]. Малое количество осадков и малоснежная зима привела к засухе.

В конце августа 2020 г. власти Севастополя

сообщили, что в Чернореченском водохранилище, которое обеспечивает город водой, осталось 22 млн. 500 тысяч кубометров воды, что составляет примерно третью часть от общего объема.

С середины октября 2020 года начата реализация плана по обеспечению водоснабжения Республики Крым и Севастополя, утвержденного правительством РФ. План предусматривает в том числе и строительство трубопровода для переброски воды из Кадыковского карьера в реку Чёрная – основной источник водоснабжения региона Севастополя [2].

Кадыковский карьер расположен в Балаклавском районе города Севастополя и входит в состав Балаклавского рудоуправления (рис. 1).

Возник карьер на месте разрабатываемого с 30-х годов Кадыковского месторождения флюсовых известняков, расположенного в крайней юго-западной части Главной гряды Крымских гор. На сегодняшний день Кадыковский карьер заброшен из-за достижения уровня залегания грунтовых вод [3].

Карьер представляет собой многоступенчатое образование с увеличивающимися по мере

достижения водного зеркала уступами шириной от 15 до 36 м. Форма карьера близка к овалу. Диаметры по глади озера соответственно – 854,34 и 251,43 м. Причиной образования водоема в Кадыковском карьере послужило затопление пресными грунтовыми водами.

Естественный приток воды в карьер ежегодно отслеживается «Балаклавским рудоуправлением». В 2017 году он составил более 300 тысяч, в 2018 — 200 с лишним тысяч м³. В настоящий момент в карьере находится порядка 4,670 миллионов кубических метров воды. Планировалось, что с Кадыковского карьера будет отбираться ежедневно 15 тысяч кубических метров [4]. Вода по трубопроводу будет поступать в Чёрную речку, затем - на третий гидроузел, где после очистки и обеззараживания она будет подаваться в водопроводную сеть. Данный водозабор должен был обеспечить регион г. Севастополя в подаче воды без ограничений до марта 2021 г., до начала наполнения паводковыми водами и введения в строй водозабора на реке Бельбек.



Рис. 1. Современный вид Кадыковского карьера

Постановка задачи

Цель работы состояла в оценке токсичности воды Кадыковского карьера, используемой в качестве дополнительного источника хозяйственно-питьевого водоснабжения города Севастополя. Одним из приёмов определения степени негативного воздействия физических, химических и биологических неблагоприятных факторов среды, потенциально опасных для жи-

вых организмов экосистем, является метод биотестирования [5].

Данная процедура заключается в установлении качества среды с помощью тест-объектов, сигнализирующих об опасности независимо от того, какие вещества и в каком сочетании вызывают изменения жизненно важных функций у тест-объектов.

Проведение биотестирования, по сравнению с аналитическим контролем, значительно

выгоднее экономически и позволяет дать ответ на вопрос об интегральной токсичности воды в более сжатые сроки и с меньшими затратами.

Биотестирование проводят с использованием не менее двух тест-объектов из разных систематических групп. За окончательный результат принимается значение, выявленное на тест-объекте, проявившем более высокую чувствительность.

В качестве тест-объектов в работе были использованы рачки дафний (*Daphnia magna* Straus) и микроводоросли (*Chlorella vulgaris* Beijer).

Все основные этапы биотестирования были автоматизированы с помощью оборудования лаборатории «Биотестирования вод» СевГУ. В комплект оборудования входит:

- климатостат, для поддержания оптимальных условий содержания дафний,
- культиватор водоросли KB-05, предназначенный для наращивания маточной культуры водоросли хлорелла,
- культиватор KBM-05 – для экспонирования проб внутри эксперимента и
- определитель плотности суспензии.

Описание исследования

Пробы воды отбирали согласно методикам [6,7]. Акт отбора проб приведен в табл. 1.

Для биотестирования использовали альгологически чистую культуру водорослей *Chlorella vulgaris* Beijer, находящуюся в экспоненциальной стадии роста. Для поддержания экспоненциальной стадии роста водорослей пересев осуществлялся ежедневно.

Для оценки токсичности использовали Методику измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления [6].

Таблица 1 Акт отбора проб

1	Дата и время отбора	25.10.2020 г., 16 ч
2	Цель пробоотбора	определение токсичности методом биотестирования
3	Место отбора	Кадыковский карьер
4	Объект отбираемой пробы	вода
5	Вид пробы	разовая

6	Вид отбора пробы	последовательный	
7	Материал емкости	полиэтилен	
8	Проба отобрана для проведения анализа	На токсичность методом биотестирования	
9	Условия отбора	t, 18 °C	pH 7,2

Тест-культура водоросли, вносилась по 2 см³ в 6 стаканов с 48 см³ контрольной и тестируемых проб воды. В результате такого (25-кратного) разбавления засеваемой культуры содержание элементов питания в тестируемой воде соответствовало 2% среде Тамия, а исходная оптическая плотность тест-культуры водоросли составляла 0,005.

Содержимое каждого стакана разливали по 6 см³ во флаконы-реакторы (по 4 флакона на каждый вариант тестируемой воды, включая контрольную пробу).

Ростовые характеристики культуры водоросли хлорелла определяли во многокуветном культиваторе KBM-05 (рис. 2).



Рис. 2. Многокуветный культиватор KBM-05 [8]

Прибор [8] позволяет в одинаковых и контролируемых условиях по температуре, интенсивности света, снабжению CO₂ (0,03%) и перемешиванию одновременно выращивать 24 пробы культуры водорослей. При оптимальном режиме (T=36,0±1,0°C, средней интенсивности света 60 Вт/м²) увеличение оптической плотности контрольной культуры водоросли и, следовательно, численности клеток за 22 часа составляет порядка 30 раз (Дконечная = 0,150±0,03). Таким образом, за это время действие загрязняющих веществ, содержащихся в пробах, проявится примерно в пяти поколениях клеток водоросли.

Все 24 запрограммированных флакона закрывались чистыми полиэтиленовыми пробками, в которых

для обеспечения оптимального газообмена со средой и предотвращения излишнего испарения культуральной жидкости сделаны отверстия диаметром 6 мм. Флаконы загружались в приостановленную кассету по ходу ее вращения. В конце первого часа эксперимента после стабилизации температуры во флаконах проверяли ее значение в контрольном варианте. Для этого термометр вводили через отверстие в пробке внутрь одного из контрольных флаконов.

Через 22 ч культивирования проводили измерение оптической плотности суспензии водоросли во всех флаконах, проводя замеры их оптической плотности в измерителе ИПС-03 (рис. 3).

Результаты регистрации результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла приведены в табл. 2.



Рис. 3. Измеритель плотности суспензии

Таблица 2 Регистрация результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла

№ пробы	Время биотестирования, час	Степень разбавления тестируемых вод, количество раз	№ повторности	Оптическая плотность	Среднее значение оптической плотности	Процентное отклонение от контроля	Наличие токсического действия пробы: оказывает, не оказывает	Предел повторяемости для 4-х результатов параллельных измерений, n=4, в %
Контроль	22	0	1 2 3 4	0,133 0,134 0,123 0,146	0,134	0	-	17
1	22	1 (без разбавления)	1 2 3 4	0,015 0,008 0,005 0,007	0,00875	93,47	оказывает	29
2	22	3	1 2 3 4	0,124 0,116 0,096 0,108	0,111	17,16	не оказывает	25
3	22	9	1 2 3 4	0,117 0,121 0,114 0,117	0,117	12,686	не оказывает	6
4	22	27	1 2 3 4	0,123 0,123 0,124 0,131	0,1252	6,567	не оказывает	6
5	22	81	1 2 3 4	0,127 0,132 0,141 0,129	0,1322	1,343	не оказывает	10

Ввиду того, что величины оптической плотности в контрольных флаконах были не ниже 0,120 - эксперимент можно считать успешным.

О степени токсического воздействия тестируемой воды на водоросли судили по разнице величины оптической плотности тест-культуры в

контрольных и опытных вариантах после 22 часов выращивания в культиваторе КВМ-05. С этой целью для каждого разведения по результатам четырех параллельных определений вычисляли среднее значение оптической плотности.

Относительную (в %) разницу средней величины оптической плотности для каждого разведения по сравнению с контролем (I) рассчитывали по формуле:

$$I = \frac{(\overline{D_K} - \overline{D_0})}{\overline{D_K}} \times 100,$$

где $\overline{D_K}$ и $\overline{D_0}$ - средние значения оптической плотности в контроле и в опыте соответственно.

Как видно из табл. 2. в 2-5 пробах снижение средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом не превышало 20 %, что свидетельствует о том, что при разбавлении воды от 3 до 81 раза проба является безвредной. В пробе без разбавления процентное отклонение от контроля составило 93,47 %. Данные результаты подтверждают токсическое действие пробы. Таким образом, использовать воду Кадыковского карьера для хозяйственно-питьевого водоснабжения без разбавления не представляется возможным. Согласно проекту [4] из водоёма ежедневно планируется забирать 15 000 кубометров воды, которая будет смешиваться с водами реки Черная в соотношении 1 : 4. При данном разбавлении вода озера будет безвредной.

В качестве второго тест-объекта использовали *Daphnia magna Straus* [7].

Определение токсичности каждой пробы без разбавления и каждого разбавления проводили в трех параллельных сериях. В качестве контроля используется три параллельные серии с культивационной водой.

Биотестирование осуществляли с соблюдением требований к температуре, продолжительности фотопериода и качеству культивационной воды [7].

Эксперимент проводили в специальных стеклянных емкостях («пробирках») объемом 100 см³, входящих в комплект устройства УЭР-03 (рис. 4) [9], которые заполнялись 50 см³ исследуемой воды. В пробирки помещали по десять дафний в возрасте 22 ч. «Пробирки» с пробами воды и тест-организмами помещали во вращающуюся кассету устройства для экспонирования рачков УЭР-03 (рис. 4). Благодаря вращению кассеты происходила непрерывная и одинаковая аэрация всех тестируемых проб. При этом вы-

бранная скорость вращения (8 оборотов в минуту) не создавала стрессовой ситуации для самих рачков.



Рис. 4. Устройства для экспонирования рачков УЭР-03 [9]

Учет смертности дафний в опыте и контроле проводили спустя 48 часов.

Неподвижные особи считались погибшими, если не начинали двигаться в течение 15 секунд после легкого покачивания пробирки.

Для определения острой токсичности исследуемых вод рассчитывается процент погибших в тестируемой воде дафний (А, %) по сравнению с контролем:

$$A = \frac{\overline{X_K} - \overline{X_T}}{\overline{X_K}} \cdot 100\%,$$

где $\overline{X_K}$ - количество выживших дафний в контроле (среднее значение из трех параллельных определений);

$\overline{X_T}$ - количество выживших дафний в тестируемой воде (среднее значение из трех параллельных определений).

Количество погибших дафний в тестируемой воде (А) по сравнению с контролем для 1, 3, 9, 27, 81-кратного разбавления тестируемой воды в долях составило, соответственно: 0,166; 0,066; 0,051; 0,033; 0,015.

Анализ этих данных показывает, что переход через критерий безвредной кратности разбавлений в виде 10%-й смертности (в долях это 0,1) имеет место между разбавлениями тестируемой воды в 1 и 3 раза. В этом случае 48,07%-ная концентрация пробы является безвредной для дафний, БКР₁₀₋₄₈=2,08 (кратность разбавления в

2,08 раз).

Результаты исследований приведены в таблице 3 и 4.

Таблица 3 Результаты биотестирования (рабочий журнал)

1	Дата, время отбора проб	25.10.2020 г., 16 ч
2	Наименование объекта	Кадыковский карьер
3	Вид отобранной пробы	разовая
4	Время хранения пробы до начала биотестирования	19 ч
5	Используемые тест - организмы, возраст	Daphnia magna Straus, возраст 6-24 ч
6	Оборудование и условия биотестирования	Климатостат Р2, температура (20±1) °С, фотопериод: 12 ч – световой, 12 ч – ночной, освещенность искусственная (1400 лк)

7	Время хранения пробы от отбора до начала биотестирования	19 ч
8	Режим кормления	10 см3 суспензии водорослей хлорелла на 200 см3 синхронной культуры за 12 часов до проведения биотестирования
9	Повторности для каждого разбавления воды	3
10	Соответствующая степень разбавления исследуемой воды	Разбавления в 1 (без разбавления), 3, 9, 27, 81 раз
11	t, pH исследуемой воды	21 °С, pH 7,2
12	Безвредное разбавление в остром опыте БКР 10-48	Кратность разбавления в 2,08 раз, 48,07%-ная концентрация

Таблица 4 - Протокол биотестирования

№ п/п	Дата биотестирования	Место отбора проб	Тест-объект	Продолжительность наблюдения (ч, сут)	Оценка тестируемой пробы
1	25.10.2020 г.	Кадыковский карьер	дафния	48 часов	Не оказывает острое токсическое действие. Безвредная кратность разбавления в 2,08 раз

Заключение

Кадыковский карьер был подключен к системе водоснабжения г.Севастополя 15 декабря 2020 г. Водозабор на карьере выполнен по уникальной технологии – это плавучая понтонная станция, на которой установлены насосы [10]. Для использования жизненно важных ресурсов в городской системе военные строители проложили более 10 километров водопроводных труб.

Как и планировалось, из водоёма ежедневно забирают 15 000 кубометров воды, что позволяет снизить нагрузку на Чернореченское водохранилище, которое остается самым крупным поставщиком воды в город (50 000 м3).

Проведенная оценка токсичности воды Кадыковского карьера методом биотестирования подтвердила безопасность использования ресурсов данного водоема для использования в хозяйственно-питьевых целях при условии разбавления с водами реки Чёрная более, чем в 3 раз.

В качестве тест-объектов в работе были использованы рачки дафний (*Daphnia magna* Straus) и микроводоросли (*Chlorella vulgaris* Beijer). Более высокую чувствительность проявил тест-объект *Chlorella vulgaris* Beijer.

Список литературы

1. 2021-й станет годом борьбы за водную автономию Крыма: Константинов [электронный ресурс] // Информационный портал «РИА Новости Крым». 2020 г. - Электрон. данные. URL: <https://crimea.ria.ru/society/20201208/1119029792/2021-y-stanet-godom-borby-za-vodnuyu-avtonomiyu-Kryma-Konstantinov.html> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
2. Анисимова Н. Севастополь ввел режим повышенной готовности из-за дефицита воды [электронный ресурс] // Информационный портал «Общество». 2020 г. - Электрон. данные. URL: <https://www.rbc.ru/society/13/10/2020/5f85e4959a7947a9de63f8b0> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
3. Парфенова И.А. Концепция рекультивации Кадыковского карьера с организацией туристско-рекреационного объекта (Севастополь, Балаклава) / И.А. Парфенова, А.И. Репецкая, Е.С. Кладченко // Экосистемы. – 2016. – Вып. 6. – С. 51–65.
4. В Кадыковском карьере под Севастополем взяли пробы воды [электронный ресурс] // Вести. Севастополь. 2020 г. - Электрон. данные. URL: <https://vesti92.ru/news/novosti/v-kadykovskom->

karere-pod-sevastopolem-vzyali-proby/ (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.

5. Григорьев Ю.С., Шашкова Т.Л., Стравинскене Е.С. Инструментальные методы биотестирования токсичности водных сред и установления класса опасности отходов: разработка, сертификация, внедрение / Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019 : сборник статей по материалам международной научно- практической конференции «Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность – 2019» (23–26 сентября 2019 г.) / под ред. Л.И. Лукиной, Н.В. Ляминой. – Севастополь: СевГУ, 2019. – С. 467-470.
6. Григорьев Ю.С. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 Т 16.1:2:3:3.7-04, ФР.1.39.2015.20001. Москва, 2004 (издание 2014 г.), 37 с.
7. Григорьев Ю.С. Устройство для выращивания микроводорослей. Патент РФ № 2165973. / Григорьев Ю.С., Андреев А.А. // Опубл. 27.04.2001. Бюл. № 12.
8. Григорьев Ю.С., Шашкова Т.Л. Методика измерений количества дафний (*Daphnia magna* Straus) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления методом прямого счета. ПНД Ф 14.1:2:4.12-06 16.1:2.3.3.9-06, ФР.1.39.2015.19999. Москва, 2006 (издание 2014 г.), 39 с.
9. Григорьев Ю.С. Способ биотестирования токсичности воды на низших ракообразных животных. Патент РФ № 2377560 / Григорьев Ю.С., Шашкова Т.Л. / Опубл. 27.12.2009. Бюл. № 36.
10. В Севастополе запустили досрочно построенный водовод на Кадыковском карьере [электронный ресурс] // Вести. Севастополь. 2020 г. - Электрон. данные. URL: <https://vesti92.ru/news/blagoustroystvo/v-sevastopolskie-doma-nachala-postupat-voda-iz-kad/> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
1. 2021-y stanet godom borby za vodnuyu avtonomiyu Kryma: Konstantinov [2021 will be the year of struggle for Crimean water autonomy: Konstantinov] Available at: <https://crimea.ria.ru/society/20201208/1119029792/2021-y-stanet-godom-borby-za-vodnuyu-avtonomiyu-Kryma-Konstantinov.html> (accessed 19.02.2021).
2. Anisimova N. Sevastopol vvel rezhim povyshennoy gotovnosti iz-za defitsita vody [Sevastopol introduced high alert due to water shortage]. Available at: <https://www.rbc.ru/society/13/10/2020/5f85e4959a7947a9de63f8b0> (accessed 19.02.2021).
3. Parfenova I.A., Repetskaya A.I., Kladchenko E.S. *Kontseptsiya rekultivatsii Kadykovskogo karyera s organizatsiyey turistko-rekreatsionnogo obyekta (Cevastopol. Balaklava)* [The concept of reclamation of the Kadykovsky quarry with the organization of a tourist and recreational facility (Sevastopol, Balaklava)]. *Ekosistemy*, 2016, Vol. 6, pp. 51–65.
4. V Kadykovskom karyere pod Sevastopolem vzyali proby vody [Water samples were taken in the Kadykovsky quarry near Sevastopol] Available at: <https://vesti92.ru/news/novosti/v-kadykovskom-karere-pod-sevastopolem-vzyali-proby/> (accessed 19.02.2021).
5. Grigoryev Yu.S., Shashkova T.L., Stravinskene E.S. *Instrumentalnyye metody biotestirovaniya toksichnosti vodnykh sred i usta-novleniya klassa opasnosti otkhodov: razrabotka. sertifikatsiya. vnedreniye* [Instrumental methods for bioassay of aquatic samples toxicity and establishing the class of waste hazards: development, certification, introduction], *Ecological, Industrial and Energy Security* – 2019, (23–26 September, 2019), Sevastopol: SevSU, 2019, pp. 467-470.
6. Grigoryev Yu.S. *Metodika izmereniy opticheskoy plotnosti kultury vodorosli khlorella (Chlorella vulgaris Beijer) dlya opredeleniya toksichno-sti pityevykh. presnykh prirodnikh i stochnykh vod. vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Methodology for measuring the optical density of the culture of the chlorella (*Chlorella vulgaris* Beijer) algae to determine the toxicity of drinking, fresh natural and waste water, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste], Moscow, 2004, 37 p.
7. Grigoryev Yu.S., Andreyev A.A. (2001) *Ustroystvo dlya vyrashchivaniya mikrovodorosley* [Microalgae growing device]. RF Patent 2165973.
8. Grigoryev Yu.S., Shashkova T.L. *Metodika izmereniy kolichestva dafniy (Daphnia magna Straus) dlya opredeleniya toksichnosti pityevykh. presnykh prirodnikh i stochnykh vod, vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya metodom pryamogo scheta* [Methodology for measuring the amount of daphnia (*Daphnia magna* Straus) to determine the toxicity of drinking, fresh natural and waste waters, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste by the direct counting method], Moscow, 2006, 39 p.
9. Grigoryev Yu.S., Shashkova T.L. (2001) *Sposob biotestirovaniya toksichnosti vody na nizshikh rakoobraznykh zhivotnykh* [Method for biotesting water toxicity in lower crustaceans]. RF Patent

References

2377560.

10. *V Sevastopole zapustili dosrochno postroenny vodovod na Kadykovskom karyere* [In Sevastopol, an early built water pipeline was launched at the Kadykovsky quarry] Available at: <https://vesti92.ru/news/blagoustroystvo/v-sevastopolskie-doma-nachala-postupat-voda-iz-kad/> (accessed 19.02.2021).

УДК 640

Диоксид кремния для очистки сточных вод от свинца

К.А. Медведева¹, Н.М. Дербасова², Ю.О. Шагова³, О.П. Гавриш⁴
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ksandpolly@mail.ru, derbasovanm@mail.ru 2,
shagova_94@mail.ru, olga_gavrish_53@mail.ru

Статья поступила 26.04.2021 г.; после доработки 29.04.2021 г.

Аннотация

В статье рассмотрены сорбционные свойства диоксида кремния, образцы которого получены в НОЦ «Перспективные технологии и материалы». Исследование сорбционных свойств диоксида кремния изучали в статических условиях в модельном водном растворе нитрата свинца.

Ключевые слова: диоксид кремния, сточные воды, очистка, сорбент

Silicon dioxide for wastewater treatment from lead

K.A. Medvedeva¹, N.M. Derbasova², Yu.O. Shagova³, O.P. Gavrish⁴
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ksandpolly@mail.ru, derbasovanm@mail.ru 2, shagova_94@mail.ru, olga_gavrish_53@mail.ru

Received 26.04.2021 y.; received in final form 29.04.2021 y.

Abstract

The article discusses the sorption properties of silicon dioxide, samples of which were obtained in the REC "Promising Technologies and Materials". The study of the sorption properties of silicon dioxide was studied under static conditions in a model aqueous solution of lead nitrate

Keywords: silicon dioxide, waste water, treatment, sorbent.

Введение

Согласно СанПиН, содержание свинца в питьевой воде не должно превышать 0.03 мг/дм³ [1], так как является антропогенным токсичным элементом группы тяжелых металлов, оказывающий негативное воздействие на живые организмы, нарушающий полноценное функциональное состояние многих систем организма человека. Поэтому проблема загрязнений вод свинцом является остроактуальной.

На сегодняшний день, очистку воды от свинца проводят химическим методом, мембранным, электрофлотационным, микробиологическим способом.

Химический метод состоит в переводе металла в нерастворимую форму, путем изменения рН до 9-10.5, в результате чего тяжелые металлы

осаждаются [2].

Минусом процесса является длительность осуществления и чувствительность к другим металлам.

Мембранный метод очистки заключается в использовании мембранных перегородок, на которых скапливаются тяжелые металлы, в том числе свинец, в виде гелеподобной массы.

Недостатками данного методами являются сложность осуществления процесса, значительные экономические затраты на мембрану высокого качества [3].

Электрофлотационное извлечение соединений свинца в присутствии соли цинка при общем содержании металлов в воде не более 0,3 г/л. Недостатком данного метода является необходимость дополнительного введения соли металлов,

трудность в извлечении гидроксида свинца. Степень его извлечения сводится к нулю [4].

Микробиологический способ – используют алканотрофные родококки, выделенные из разных природных субстратов [5].

Проведены эксперименты по исследованию диоксида кремния, в качестве сорбента, для очистки вод от ионов свинца, отличающийся от аналогов высокой степенью очистки, простотой технологического процесса.

Цели и задачи исследования

Целью работы является исследование очистки сточных вод от свинца с использованием диоксида кремния, образцы которого получены в НОЦ «Перспективные технологии и материалы». Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи: анализ морфологии поверхности образца диоксида кремния, разработка методики проведения эксперимента, анализ результатов.

Методика исследований

Для исследования свойств диоксида кремния как сорбента использовали образцы, полученные в НОЦ «Перспективные технологии и материалы» [6].

Морфология поверхности образцов нанопорошка диоксида кремния анализировалась на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX фирмы: Phenom-World B.V. (Нидерланды) с интегрированной системой яэнерго-дисперсионного анализа.

Максимальное увеличение 150000, разрешение 10 нм, ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ. Для анализа размера, формы и морфологии частиц использовали программное обеспечение ParticleMetric, позволяющее анализировать изображение частиц.

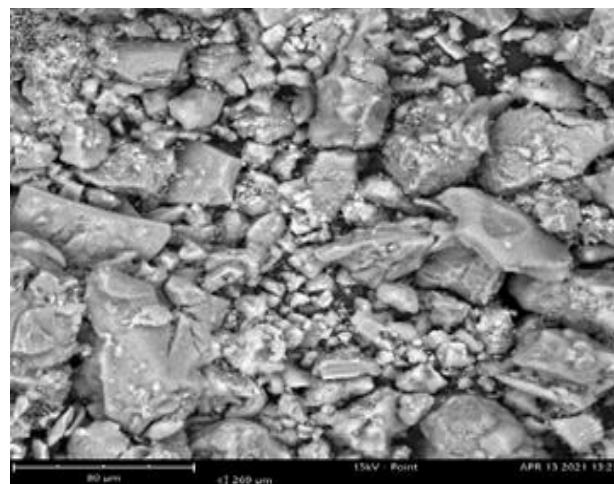


Рис. 1. Морфология поверхности диоксида кремния

Микрофотографии частиц исследуемого порошка диоксида кремния, полученные на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX при разном увеличении, представлены на рисунке 1.

Из представленных данных видно, что размерность частиц составляет от 2,65 до 9,29 микронметр (рис. 2).

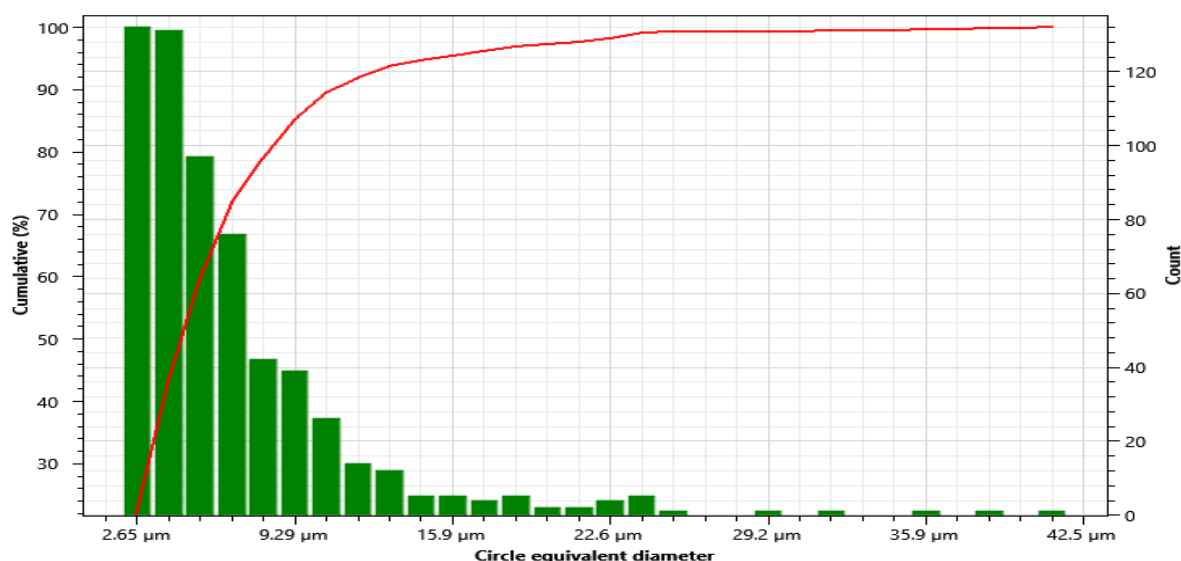


Рис. 2. Среднее распределение частиц диоксида кремния по размерам

Исследование сорбционных свойств диоксида кремния изучали в статических условиях в модельном водном растворе нитрата свинца ($Pb(NO_3)_2$).

Для получения кинетических кривых сорбции в серию пробирок помещали навески (m) сорбента по 0,5 г, заливали их 100 мл (V) водного раствора $Pb(NO_3)_2$ с концентрацией Pb^{2+} 0,3 мг/л.

Через определенные промежутки времени раствор отделяли от сорбента фильтрованием и определяли в нем текущую концентрацию ионов металлов (C) рентгенофлуоресцентным методом на приборе СПЕКТРОСКАН МАКС-GVM с использованием «Методики выполнения измерений массовой концентрации свинца, цинка, меди, никеля, кобальта, железа, хрома, ванадия, висмута, кадмия, селена, мышьяка в питьевых, природных и сточных водах рентгенофлуоресцентным методом после концентрирования их пирролидиндитикабаминатных комплексов на фильтрах».

Концентрацию свинца в пробе воды вычисляли по формуле:

$$X = \frac{m}{V} \quad (1)$$

где V – объем аликвоты пробы воды, см³

m – масса металла, осажденная на фильтре, мкг.

Результат измерений представляли в виде:

$$X \pm \Delta X \text{ мг/дм}^3, \text{ при } P = 0,95.$$

где ΔX — граница абсолютной погрешности измерений, вычисленная по формуле:

$$\Delta X = 0,0007 + 0,35 X \quad (2)$$

где X – результат намерений, мг/дм³

Результаты и их обсуждение.

Результаты исследования процесса сорбции ионов свинца диоксидом кремния представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты измерения массы Pb^{2+} элемента на фильтре с исходной концентрацией раствора 0,3 мг/л.

№ пробы	t, мин	mp(c)мкг/ф	Xp(c)мг/л
исх	0	3,23	0,323 ± 0,113
1	15	2,06	0,206±0,0730
2	25	1,71	0,171±0,060
3	35	1,62	0,162±0,0574
4	45	1,60	0,160±0,056
5	65	1,54	0,154±0,054

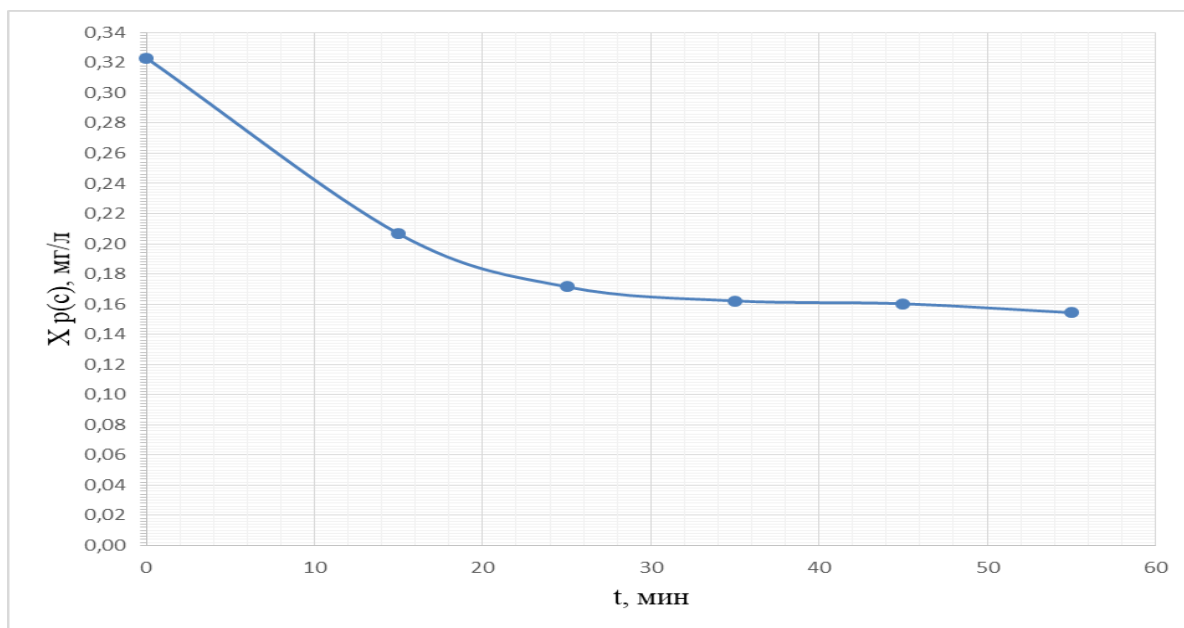


Рис. 3. Кинетическая кривая сорбции ионов свинца диоксидом кремния

Для определения параметров, характеризующих сорбционные свойства диоксида кремния, была получена кинетическая кривая сорбции ионов Pb^{2+} (рис. 3).

Согласно полученным данным, диоксид кремния, эффективно сорбирует ионы свинца. Среднее время достижения сорбционного равновесия в гетерогенной системе водный раствор нитрата свинца – сорбент составляет 30 мин.

Установлено, что сорбент хорошо задерживает ионы тяжелых металлов в разных концентрациях (таблица 2, рис. 4).

Таблица 2. Результаты измерения массы Pb^{2+} элемента на фильтре при разных исходных концентрациях раствора

№	m(исх) мкг/ф	X(исх) мг/л	m (конечн.) мкг/ф	X, мг/л
1	11,53	1,153±0,297	2,38	0,238±0,132
2	44,87	4,487±1,571	5,04	0,504±0,177
3	60,14	6,014±1,172	5,47	0,547±0,188
4	82,11	8,211±1,568	28,36	0,283±0,141

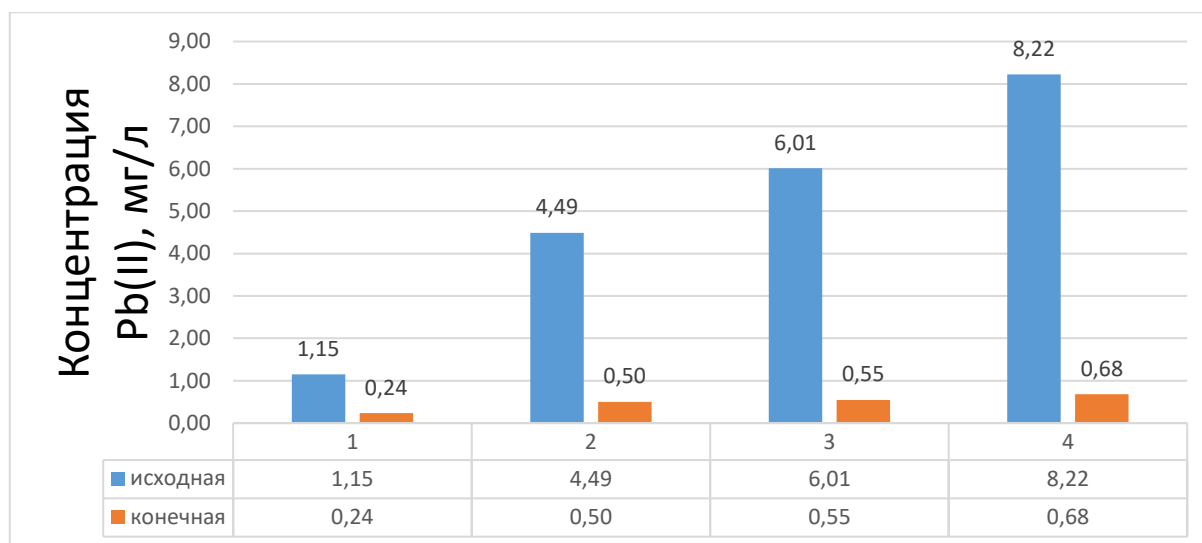


Рис.4. Диаграммы изменения концентрации

Выводы

Исследованы сорбционные свойства сорбента — диоксида кремния по отношению к ионам свинца. Степень извлечения ионов свинца при исходной концентрации 8,2 мг/л составляет 96,5 %.

Сорбент обладает хорошей улавливающей способностью для извлечения ионов свинца из водных растворов, о чем свидетельствуют значения сорбционной емкости.

Полученные экспериментальные данные позволяют порекомендовать использовать сорбент для извлечения ионов тяжелых металлов из водных растворов различной природы.

Список литературы

1. Нормы качества питьевой воды. СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода 1074-01. – М.: ДЕАН, 2001. – 90 с
2. Высоцкий С.П. Очистка сточных вод от тяжелых металлов / С.П. Высоцкий, Д.И. Ермакова, Т.И.

Степаненко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. – №2

3. Видякин М.Н. Особенности внедрения мембранных биореакторов для обработки сточных вод / М.Н. Видякин, С.А. Гарипова // Экология производства. – 2014. – №11. – с. 62 – 68.
4. Перфильева А.В. Интенсификация и повышение эффективности электрофлотационного процесса извлечения малорастворимых соединений хрома (III) и свинца из водных растворов: дис. к.т.н. 05.17.03: – М., 2014. – 155 с
5. Пат. 2216525C1 Российская Федерация, МПК C02F3/34 C12N1/20 C12N1/20 C12R1/01/Соловьев Г.Н., Ушакова Е.И., Ившина И.Б., Раимова Е.К заявл. 11.03.02; опубл. 20.11.03
6. Исследования диоксида кремния микронного и субмикронного размера из отходов карьерного производства, полученного методом осаждения/ Н.М. Дербасова, О.П. Гавриш, В.М. Гавриш и [др.], Энергетические установки и технологии. – 2020. – № 6. – с. 98-104

References

1. Drinking water quality standards. SanPiN 2.1.4.1074-01. Potable water 1074-01. – M.: DEAN,

2001. - 90 s

2. Vysotsky S. P. Purification of waste water from heavy metals / S. P. Vysotsky, D. I. Ermakova, T. I. Stepanenko // Scientific Bulletin of NIIGD "Respirator". – 2017. - №2
3. Vidyakin M. N. Features of introduction of membrane bioreactors for wastewater treatment / M. N. Vidyakin, S. A. Garipova // Production ecology. - 2014. - No. 11. - p. 62-68
4. Perfil'eva A. V. Intensification and increasing the efficiency of the process flotation extraction of low-soluble compounds of chromium (III) and lead from aqueous solutions: dis. Ph. D. 05.17.03: – M., 2014. – 155 p.
5. Pat. 2216525C1 Russian Federation, IPC C02F3/34 C12N1/20 C12N1/20 C12R1/01/Palomino G. N., Ushakova E. I., I. B. Ivshina, Raimov E. Appl. 11.03.02; publ. 20.11.03
6. Studies of micron-and submicron-sized silicon dioxide from quarry production waste obtained by deposition / N. M. Derbasova, O. P. Gavrish, V. M. Gavrish

УДК 502.3:669.18

Очистка сточных вод, содержащих органические примеси с помощью нанопорошка оксида вольфрама

Д.Д. Нарбекова¹, Н.М. Дербасова², В.М. Гавриш³, А.А. Кондакова⁴
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, narbekovadarya@mail.ru, ¹ derbasovanm@mail.ru, ² olga_gavrish_53@mail.ru, ³ ngudimenko12@mail.ru

Статья поступила 28.04.2021 г.; после доработки 30.04.2021 г.

Аннотация

Проведены исследования по фотокаталитической активности наночастиц оксида вольфрама, на примере разложения органического вещества метилен синего. Использованы концентрации 9, 13, 15, 20 мг/л и выявлен оптимальный диапазон фотокаталитической эффективности, который составляет 15 мг/л.

Ключевые слова: фотокатализ, наночастицы WO₃, метилен синий, видимый свет.

Treatment of wastewater containing organic impurities with tungsten oxide nanopowder

D.D. Narbekova¹, Derbasova N.M.², Gavrish V.M.³, Kondakova A.A.⁴
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, narbekovadarya@mail.ru, ¹ derbasovanm@mail.ru, ² olga_gavrish_53@mail.ru, ³ ngudimenko12@mail.ru

Received 28.04.2021 y.; received in final form 30.04.2021 y.

Введение

В наше время известно немало промышленных отраслей, выпускающих нерегулируемые стоки, в которых содержатся органические вещества, что представляет опасность для живых существ и водных объектов [1-3]. Содержащиеся в сточных водах красители органического происхождения вызывают серьезные аллергические реакции у человека и влияют на фотосинтетическую активность фитопланктонов [4]. Существуют следующие виды очистки сточных вод от органических примесей:

- биологические методы (биологические пруды)-химические методы (окислительные процессы, хлорирование)
- физико-химические методы (флокуляция, коагуляция)
- массообменные методы (мембранные процессы, адсорбция).

Однако они преобладают рядом недостатков: высокое потребление воды, большие затраты электроэнергии, большое образование

осадка, экономически неэффективны, при реализации дешевых способов (коагуляция, флокуляция) образуется много побочных продуктов и требуется доочистка воды [5]. Фотокаталитические методы являются самими перспективными для очистки сточных вод от примесей, поскольку они экологически безопасны и обладают высокой окислительной способностью, что позволяет эффективно удалять органические вещества в воде [6].

В качестве фотокатализатора используются многие полупроводники, однако они работают только в рамках ультрафиолетового света [7]. Исключением является оксид вольфрама [8], [9]. Его способности заключаются в том, что он ускоряет химическую реакцию под воздействием видимого света. Помимо очистки сточных вод, оксид вольфрама можно применять в обеззараживании помещений, при борьбе со смогом в крупных городах и так далее.

В работе изучена фотокаталитическая активность наночастиц оксида вольфрама под действием видимого света в реакциях разложения

органического поллютанта (метиленовый синий).

Методика исследований

Для изучения фотокаталитической активности наночастиц оксида вольфрама под действием видимого света использовали образцы, полученные в НОЦ «Перспективные технологии и материалы».

С целью проверки морфологии поверхности образцов нанопорошка оксида вольфрама использовали сканирующий электронный микроскоп PHENOM proX фирмы: Phenom–World B.V. (Нидерланды) с интегрированной системой энергодисперсионного анализа. Максимальное увеличение 150000, разрешение 10 нм, ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ. Для анализа размера (рис. 1), формы и морфологии частиц использовали программное обеспечение ParticleMetric, позволяющее анализировать изображения частиц.

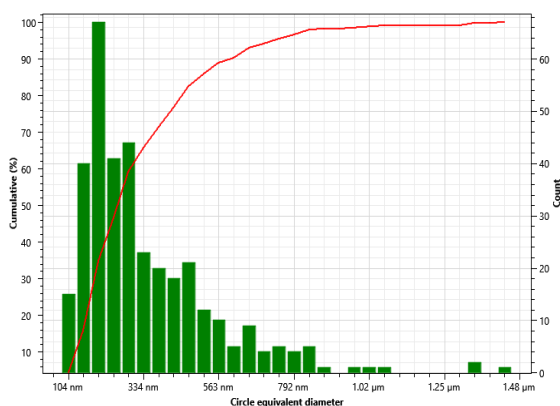


Рис.1. Среднее распределение агломератов оксида вольфрама по размерам

Анализ гранулометрического состава, показал, что основной диапазон размеров частиц составляет примерно 200 нм.

Фотокаталитическую активность нанопорошка оксида вольфрама изучали в водных растворах метилен синего концентрацией 9, 13, 15, 20 мг/л. Процесс разложения метилен синего исследовали с помощью метода спектрофотометрии, а также по изменению цвета раствора в ходе фотокаталитической реакции. Навеску нанопорошка массой 0,2 г помещали в круглую плоскодонную колбу добавляли 200 мл раствора метилен синего.

Облучали стандартной LED лампой белого цвета фирма WELLMAX с температурой 4000 К в диапазоне длин волн 380 ... 780 нм. в течение

10 ч, постоянно перемешивая на магнитной мешалке «Ритм -01» со скоростью вращения якоря 500 об/мин.

Пробоотбор осуществляли каждые 2 часа для контроля протекания фотохимической реакции и наблюдения за изменением концентрации поллютанта в растворе, при этом 10 мл пробы центрифугировали в течение 15 мин при 3000 об/мин, отделяя осадок. После декантировали раствор и на фотометре «Эксперт 003» изготовитель ООО «ЭКОНИКС – ЭКСПЕРТ» оценивали концентрацию красителя по степени обесцвечивания раствора. После анализа пробу обратно возвращали в исходный раствор.

Для оценки степени фотокаталитической активности оксида вольфрама использовали формулу:

$$E = [(C_0 - C_k) / C_0] \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где E — фотокаталитическая активность образца, %;

C₀ — исходная оптическая плотность красителя в растворе;

C_k — конечная оптическая плотность красителя в растворе.

Результаты расчетов представлены на графике 2. Через 10 часов непрерывного процесса значение спектра красителя снизилось почти на 90%.

Из анализа полученных данных видно, что процесс разложения метилен синего наиболее эффективен в первые 6 часов и носит равномерный характер, в среднем эффективность разложения каждые 2 часа составляет до 15 %. За 10 часов непрерывного процесса значение спектра красителя при концентрации 9, 13, 15 мг/л снизилось на 90%, при концентрации 20 мг/л на 60%.

Из работ [10] выявлено, что разложение растворов метилен синего подвергается кинетике первого порядка, которая выражена уравнением:

$$\ln(C_0/C) = k_{app} \times t$$

Где C₀ - начальная концентрация раствора метилен синего,

C - концентрация в данный момент времени,
k_{app} - константа скорости разложения.

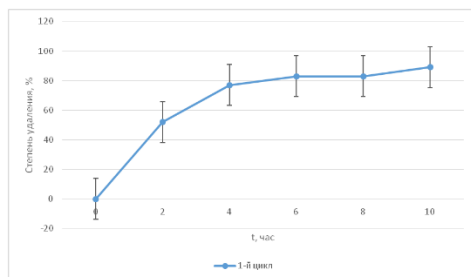
Для определения константы скорости разложения в нашем случае были построен график зависимости $\ln(C_0/C)$ от времени представленный на рис. 3.

Линейная зависимость данных между $\ln(C_0/C)$ и временем облучения к приведенному выше уравнению подтвердила применимость этой модели со значениями коэффициентов корреляции

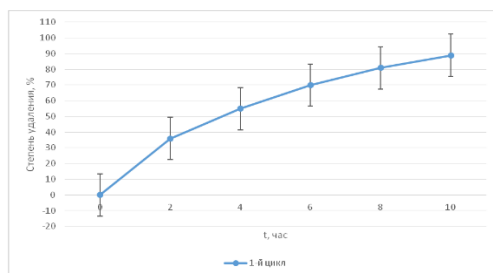
0,9489; 0,9995; 0,9984 и 0,9931. Константа скорости разложения (k_{app}), полученная по наклону участка, составила $3,7 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$, $3,45 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$, $3,9 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ и $1,53 \times 10^3 \text{ мин}^{-1}$ для концентраций 9, 13, 15, 20 мг/л соответственно.

Таким образом, чем выше k_{app} , тем меньше время, необходимое для полного разложения метилена синего. Из представленных данных видно, что фотокаталитическая активность оксида вольфрама наиболее эффективна для концентрации метилена синего 15 мг/л.

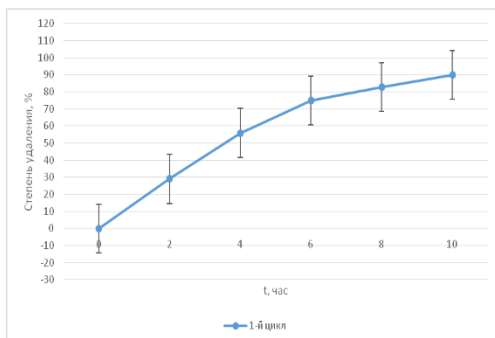
а)



б)



в)



г)

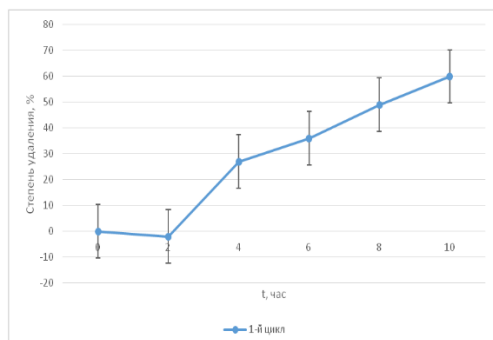


Рис. 2. Данные фотокаталитической активности в реакции фоторазложения красителя метилена синего (9 (а), 13 (б), 15 (в), 20 (г) мг/л)

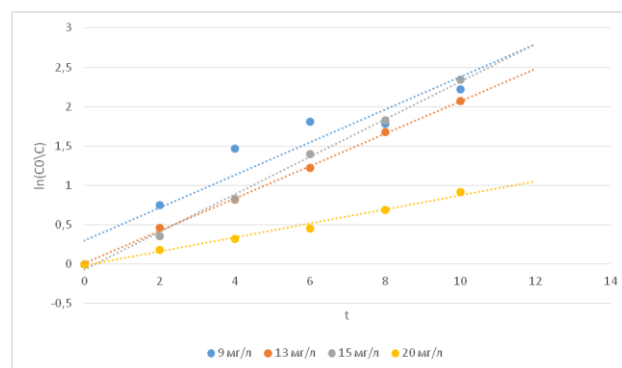


Рис. 3. График зависимости $\ln(C_0/C)$ от времени

Выводы

Полученные данные фотокаталитической активности агломератов нанопорошка оксида вольфрама свидетельствуют о том, что он может эффективно найти применение в технологии очистки сточных вод от органических веществ.

Список литературы

1. Feng, M., Liu, Y., Zhao, Z., Huang, H., Peng, Z. The preparation of Fe doped triclinic-hexagonal phase heterojunction WO₃ film and its enhanced photocatalytic reduction of Cr (VI). *Materials Research Bulletin*, 2019, pp. 168-174.
2. Lakhera, S.K., Hafeez, H.Y., Venkataramana, R., Veluswamy, P., Choi, H., Neppolian, B. Design of a highly efficient ternary AgI/rGO/BiVO₄ nanocomposite and its direct solar light induced photocatalytic activity, *Applied Surface Science*, 2019, pp. 1289-1300
3. Zheng, N.-C., Wang, Z., Long, J.-Y., Kong, L.-J., Chen, D.-Y., Liu, Z.-Q. Shape-dependent adsorption of CeO₂ nanostructures for superior organic dye removal, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, pp. 225-233
4. Ahmed, K.E., Kuo, D.-H., Zeleke, M.A., Zelekew, O.A., Abay, A.K. Synthesis of Sn-WO₃/g-C₃N₄ composites with surface activated oxygen for visible light degradation of dyes, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2019, pp. 133-141
5. Джубари М. Кадер Современные технологии очистки сточных вод, содержащих пигменты и красители / Джубари М. Кадер, Алексеева Н.В // Уфимский государственный авиационный технический университет, 2020 – pp. 288-291
6. Sun, H., Guo, F., Pan, J., Huang, W., Wang, K., Shi, W One-pot thermal polymerization route to prepare N-deficient modified g-C₃N₄ for the degradation of tetracycline by the synergistic effect of photocatalysis and persulfate-based advanced oxidation process, *Chemical Engineering Journal*, 2021
7. Govindaraj, T., Mahendran, C., Manikandan, V.S., Suresh, R., One-pot synthesis of tungsten oxide

nanostructured for enhanced photocatalytic organic dye degradation, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, pp. 17535-17549.

8. Bilal Tahir, M., Sagir, M., Carbon nanodots and rare metals (RM = La, Gd, Er) doped tungsten oxide nanostructures for photocatalytic dyes degradation and hydrogen production, *Separation and Purification Technology*, 2019, pp. 94-102.
9. Sharma, S., Basu, S., Highly reusable visible light active hierarchical porous WO₃/SiO₂ monolith in centimeter length scale for enhanced photocatalytic degradation of toxic pollutants, *Separation and Purification Technology*, 2020, art. no. 115916
10. R. Xu, M. Su, Y. Liu, Z. Chen, C. Ji, M. Yang, X. Chang, D. Chen, J. Clean. Prod. 242, 118366 (2020)
- Q. Wang, X. Lei, F. Pan, D. Xia, Y. Shang, W. Sun, W. Liu, Colloid. Surf. A. 555, 605–614 (2018)
11. Loka, C., Lee, K.-S. Email Preparation and photocatalytic performance of silver nanocrystals loaded Cu₂O-WO₃ composite thin films for visible light-active photocatalysis. *Materials Research Bulletin*-Volume 137, May 2021, 111192
12. rGO/Bi₂WO₆ composite as a highly efficient and stable visible-light photocatalyst for norfloxacin degradation in aqueous environment. Zhao, Y., Liang, X, Hu, X, Fan, J. *Journal of Colloid and Interface Science* Volume 589, May 2021, Pages 336-346

References

1. Feng, M., Liu, Y., Zhao, Z., Huang, H., Peng, Z. The preparation of Fe doped triclinic-hexagonal phase heterojunction WO₃ film and its enhanced photocatalytic reduction of Cr (VI). *Materials Research Bulletin*, 2019, pp. 168-174.
2. Lakhera, S.K., Hafeez, H.Y., Venkataramana, R., Veluswamy, P., Choi, H., Neppolian, B. Design of a highly efficient ternary AgI/rGO/BiVO₄ nanocomposite and its direct solar light induced photocatalytic activity, *Applied Surface Science*, 2019, pp. 1289-1300
3. Zheng, N.-C., Wang, Z., Long, J.-Y., Kong, L.-J., Chen, D.-Y., Liu, Z.-Q. Shape-dependent adsorption of CeO₂ nanostructures for superior organic dye removal, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2018, pp. 225-233
4. Ahmed, K.E., Kuo, D.-H., Zeleke, M.A., Zelekew, O.A., Abay, A.K. Synthesis of Sn-WO₃/g-C₃N₄ composites with surface activated oxygen for visible light degradation of dyes, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 2019, pp. 133-141
5. Jubari M. Kader, Alekseeva N.V. Modern technologies for the treatment of waste water containing pigments and dyes. Ufa State Aviation Technical University, 2020, pp. 288-291
6. Sun, H., Guo, F., Pan, J., Huang, W., Wang, K., Shi, W, One-pot thermal polymerization route to prepare N-deficient modified g-C₃N₄ for the degradation of

tetracycline by the synergistic effect of photocatalysis and persulfate-based advanced oxidation process, *Chemical Engineering Journal*, 2021

7. Govindaraj, T., Mahendran, C., Manikandan, V.S., Suresh, R., One-pot synthesis of tungsten oxide nanostructured for enhanced photocatalytic organic dye degradation, *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2020, pp. 17535-17549.
8. Bilal Tahir, M., Sagir, M., Carbon nanodots and rare metals (RM = La, Gd, Er) doped tungsten oxide nanostructures for photocatalytic dyes degradation and hydrogen production, *Separation and Purification Technology*, 2019, pp. 94-102.
9. Sharma, S., Basu, S., Highly reusable visible light active hierarchical porous WO₃/SiO₂ monolith in centimeter length scale for enhanced photocatalytic degradation of toxic pollutants, *Separation and Purification Technology*, 2020, art. no. 115916
10. R. Xu, M. Su, Y. Liu, Z. Chen, C. Ji, M. Yang, X. Chang, D. Chen, J. Clean. Prod. 242, 118366 (2020)
- Q. Wang, X. Lei, F. Pan, D. Xia, Y. Shang, W. Sun, W. Liu, Colloid. Surf. A. 555, 605–614 (2018)
11. Loka, C., Lee, K.-S. Email Preparation and photocatalytic performance of silver nanocrystals loaded Cu₂O-WO₃ composite thin films for visible light-active photocatalysis. *Materials Research Bulletin*-Volume 137, May 2021, 111192
12. rGO/Bi₂WO₆ composite as a highly efficient and stable visible-light photocatalyst for norfloxacin degradation in aqueous environment. Zhao, Y., Liang, X, Hu, X, Fan, J. *Journal of Colloid and Interface Science* Volume 589, May 2021, pp. 336-346

УДК 628.161.2

Оценка эффективности ингибиторов отложений осадков с учетом коэффициента упаривания воды

Ю.А. Омельчук, Г.В. Кучерик, Е.В. Заблоская, О.В. Флёрко
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, Galina_kucherik@mail.ru

Статья поступила 14.04.2021 г.; после доработки 16.04.2021 г.

Аннотация

В работе исследованы новые ингибиторы накипеобразования. Проведена оценка эффективности ингибиторов отложений осадков с учетом коэффициента упаривания воды. Показано, что сульфонаты весьма эффективны как ингибиторы накипеобразования при температурах до 60 °С, а производные диметилсульфонат фосфиновой кислоты не уступают по эффективности лучшим ингибиторам накипеобразования – ОЭДФК и НТМФК при температурах от 40 до 100 °С при коэффициенте упаривания до 2,63.

Ключевые слова: ингибиторы, коэффициент упаривания воды, противонакипной эффект, стабилизационный эффект.

Evaluation of the effectiveness of sediment inhibitors taking into account the coefficient of water evaporation

Yu.A. Omelchuk, G.V. Kucherik, E.V. Zablotskaya, O.V. Flyorko
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
Galina_kucherik@mail.ru

Received 14.04.2021 y.; received in final form 16.04.2021 y

Abstract

The work investigated new inhibitors of scale formation. An assessment of the effectiveness of sediment inhibitors was carried out, taking into account the coefficient of water evaporation. It has been shown that sulfonates are very effective as scale inhibitors at temperatures up to 60 °C, and derivatives of phosphinic acid dimethyl sulfonate are not inferior in efficiency to the best scale inhibitors - HEDPA and NTMPA at temperatures from 40 to 100 °C with an evaporation coefficient of up to 2.63.

Keywords: inhibitors, water evaporation coefficient, anti-scale effect, stabilization effect.

Введение

Вода является хорошим теплоносителем, но, несмотря на прекрасные теплофизические свойства, низкую стоимость, негорючесть, экологическую и токсикологическую безопасность воды, ее эксплуатация связана с рядом проблем, к числу которых относятся: высокая коррозионная активность по отношению к металлам,

склонность к накипеобразованию.

При использовании воды в качестве теплоносителя технологические процессы становятся менее эффективными, оборудование быстрее изнашивается. Теплообмен ухудшается из-за выпадения солей жесткости на металлических поверхностях. После очистки и промывки эти поверхности вновь покрываются ржавчиной и солями, что делает оборудование малоприспособленным.

для последующего применения. Один из способов борьбы с коррозией – добавление в воду химических соединений (или их композиций) – ингибиторов коррозии, присутствие которых в небольших количествах в агрессивной среде замедляет коррозию металлов. Их защитное действие обусловлено изменением состояния поверхности металла вследствие адсорбции или образования с ионами металла труднорастворимых соединений. Последние образуют на поверхности пленку, которая существенно тоньше конверсионных защитных покрытий. Замедление коррозии происходит из-за уменьшения площади активной поверхности металла и изменения энергии активации электродных реакций, лимитирующих сложный коррозионный процесс. Ингибиторы коррозии могут тормозить анодное растворение и вызывать пассивацию металла (анодные ингибиторы коррозии), снижать скорость катодного процесса (катодные ингибиторы коррозии) или замедлять оба эти процесса (смешанные ингибиторы коррозии) [1].

Широко применяющиеся ныне ингибиторы коррозии и накипеобразования для воды, например, содержащие хром, цинк, амины и др., часто являются токсичными и экологически опасными.

В то же время некоторые нетоксичные ингибиторы коррозии, в частности фосфаты, силикаты и их смеси используют для предотвращения образования отложений и коррозии в системах теплообмена.

Эффективным и экономически выгодным является использование для защиты углеродистой стали от коррозии хроматов и их композиций. В [2] показано эффективность как ингибитора коррозии смеси $20 \cdot 10^{-4} \%$ CrO_4^{2-} и $4 \cdot 10^{-4} \%$ Zn^{2+} .

Достаточно хорошо изучены противонакипные свойства оксиэтилидендифосфоновой кислоты (ОЭДФК) и нитрилотриметилфосфоновой кислоты (НТМФК) [3], данные ингибиторы являются и эффективными ингибиторами коррозии в различных средах, широко применяются их цинковые соли.

Авторами [4] изучены процессы коррозии стали в питьевой воде в промышленных условиях в присутствии в качестве ингибитора технического полифосфата натрия $(\text{NaPO}_3)_n \cdot \text{H}_2\text{O}$ при его дозе $0,3 - 0,5 \text{ мг/дм}^3$ по PO_4^{3-} .

Показано [5], что для предотвращения коррозии трубопроводов в условиях невысокой жесткости воды полифосфаты (ПФН) являются эффективными ингибиторами при дозе $2-3 \text{ кг/м}^3$

и pH на уровне 7–8.

Органические соединения, в структуру молекулы которых входит азот, обладают противокоррозионными свойствами. Достаточно высокие ингибирующие свойства азотсодержащих органических соединений обуславливаются активностью р-электронов, их взаимодействием с металлом и, как результат, образованием на поверхности гидрофобного защитного слоя [6]. Защитное действие оказывают амины, амиды, азолы, имидазолы, имидазолины и их производные.

В работе [7] показано, что перспективными ингибиторами коррозии являются алкилфосфаты, фосфонаты, фосфинаты. А именно изучено защитное действие от коррозии ДМФК, диметилфосфината цинка (ДМФЦ), метилолсульфоната цинка (МСЦ), МЭА, ТЭА, ТЭАХ, цетилтриэтилцинкфосфатаммоний бромида (ЦТЭЦФАБ), диэтиленцианмоноэтанолламмоний хлорида (ДЭЦМЭАХ), ДЭЦДЭАХ, ДЭЦДЭФАХ, додецилсульфата цинка (ДСЦ), диэтиленциандиэтиленцинкфосфатаммоний хлорида (ДЭЦДЭЦФАХ), нитробензоата натрия (НБН), диметилсульфоксида (ДМСО), морфолиний нитробензоата (МНБ), морфолина, аммиака. Весьма эффективным является ЦТЭЦФАБ, использование которого уже при дозе 2 мг/дм^3 обеспечивает степень защиты от коррозии на уровне 95 %. ДМФК обеспечивает достаточно высокий стабилизационный эффект, но как ингибитор коррозии металлов лучшие результаты показывает его цинковая соль – ДМФЦ.

Изучено влияние коагулянтов – сульфата железа, сульфата алюминия и ингибитора коррозии триполифосфата натрия на коррозионную стойкость углеродистой стали Ст 3 [8]. Ионы железа (III) стимулируют коррозионные процессы, ионы алюминия менее влияют на коррозионные процессы и наиболее эффективным для защиты стали от коррозии является триполифосфат натрия в дозе 100 мг/дм^3 и его композиция с цинком (5 мг/дм^3).

В водных системах охлаждения для ингибирования коррозии и солеотложения часто используют различные композиции, например, в их состав может входить полиаспаргиновая кислота с молекулярным весом 500–10000 и фосфонатный олигомер $\text{H}[\text{CHRCRHR}]_n\text{--PO}_3\text{M}_2$, где $1 \leq n \leq 5$, при чем соотношение полиаспаргиновой кислоты и фосфонатного олигомера равно 1:4–1:9 [9]; или 10 – 100 массовых частей фосфونикарбоксильного соединения общей формулы $\text{H}[\text{HC}(\text{CO}_2\text{R})\text{HC}(\text{CO}_2\text{R})]_n\text{PO}_3\text{R}_2$, где $1 \leq n \leq 8$ и

R – независимые друг от друга H, Na, K, NH₄ или алкил C₁–C₄, 1–10 жирного амина общая формула которого R'[N(H)–(CH₂)_m]_nNH₂, где 2 ≤ m ≤ 8 и 0 ≤ n ≤ 2, а R' – насыщенный или ненасыщенный алифатический радикал C₁₂–C₂₂, 5–50 ПАВ, эта композиция достаточно эффективна для защиты и от коррозии и от накипеобразования (степень защиты ≥ 97 %) [10].

Постановка задачи

Необходимость в разработке новых ингибиторов обусловлена тем, что известные реагенты не совсем удовлетворяют существующим требованиям. Прежде всего, следует отметить, что при гидролизе полифосфаты превращаются в неактивные о-фосфаты, которые не только ускоряют осадкоотложения за счёт нерастворимых фосфатов кальция, но и за счёт того, что фосфор является биогенным элементом, стимулируют биообращение на градирнях, других сооружениях и в коммуникациях.

Фосфоновые кислоты являются дорогими реагентами. А если учитывать большие объемы воды в оборотных системах, то их использование приводит к значительным издержкам.

Сульфонаты, полученные из доступных реагентов, таких как формальдегид, сульфит натрия, мочевины, меламина, сульфаминовая кислота, гипофосфит натрия, в случае достаточной эффективности могут позволить снизить расходы на водоподготовку, в целом повысить эффективность использования воды.

Поэтому были разработаны высокоэффективные ингибиторы на основе доступных метилсульфонатов.

В процессах синтеза стабилизаторов накипеобразования и ингибиторов коррозии использовали реакции конденсации амидов с альдегидами и метилольными соединениями.

Натриевую соль диметиленсульфоната фосфиновой кислоты (НДМСФК) (I) получали при взаимодействии натриевой соли диметилфосфиновой кислоты с сульфитом натрия. Выход продукта (I) составляет 81 %.

Тетраметиленсульфонат карбамида (ТМСК) (II), тетраметиленсульфонат тиокарбамида (ТМСТК) (III) получали при взаимодействии соответствующих амидов, гексаметиленсульфонат меламина (ГМСМ) (IV), гидрохлорид тетраметиленсульфонат гуанидина (ГХТМСГ) (V) и нитридиметилсульфонат сульфата натрия (НДМС-САН) (VI) – аминов с метилолсульфонатом.

Получение сульфонов II–VI проводили в

концентрированных растворах. Данные продукты из растворов не выделяли, поэтому их реальное химическое строение не подтверждено специальными исследованиями, а выбрано с учетом возможного направления протекания реакций.

Кроме синтезированных ингибиторов для сравнения в работе использовали ОЭДФК, НТМФК, ТПФNa, ГМФNa, гипан, композиция ОЭДФК; Zn²⁺ (2,0 – 5,0 мг/дм³).

Цель работы состояла в оценке эффективности ингибиторов отложений осадков с учетом коэффициента упаривания воды.

Описание исследования

В реальных условиях работы систем охлаждения происходит упаривание воды с возрастанием концентрации солей, включая и солей жесткости. В итоге склонность воды к осадкоотложениям значительно возрастает. Поэтому при испытании ингибиторов накипеобразования необходимо учитывать концентрирование солей при упаривании воды. В данной работе коэффициент упаривания (КУ) изменяли от 1,29 до 2,63.

В качестве рабочей среды использовали севастопольскую водопроводную воду, воду Симферопольского водохранилища табл. 1).

Таблица 1. Характеристики водных сред

Показатели	Водопроводная вода, г. Севастополь	Симферопольское водохранилище, г. Симферополь
pH	7,5–8,3	7,9–8,1
Общая жесткость, мг-экв/дм ³	7,2–8,5	4,2–4,6
[Ca ²⁺], мг-экв/дм ³	5,5–6,6	2,9–3,2
[Mg ²⁺], мг-экв/дм ³	1,2–1,4	1,2–1,4
Щелочность, мг-экв/дм ³	4,0–8,0	3,9–4,1

В качестве ингибиторов накипеобразования, кроме известных фосфоновых – оксиэтилендифосфиновой кислоты (ОЭДФК) и нитрилтриметилфосфиновой кислоты (НТМФК), были использованы более дешевые полифосфатные реагенты, такие как триполифосфат натрия (ТПФNa) и гексаметафосфат натрия (ГМФNa). Кроме того, были использованы натриевая соль диметиленсульфонатфосфиновой кислоты (НДМСФК) (I), тетраметиленсульфонат карба-

мида (ТМСК) (II), тетраметилсульфонат тиокарбамида (ТМСТК) (III), гексаметиленсульфонат меламина (ГМСМ) (IV), гидрохлорид тетраметилсульфонат гуанидина (ГХТМСГ) (V), нитрилдиметиленсульфонат сульфата натрия (НДМССАН) (VI), цинковая соль нитрилдиметиленсульфонат сульфата натрия (НДМССАН) (VII), диметилфосфиновая кислота (ДМФК) (VIII).

Для проведения исследований по оценке эффективности ингибиторов накипеобразования в севастопольской водопроводной воде использовали термостат. Температура поддерживалась строго 40 °С. Пробы исходной воды и пробы воды, обработанные стабилизаторами в объеме 100 см³, помещались в термостат при t = 40 °С и выдерживались до тех пор, пока пробы не упаривались на 30 – 40% (τ = 60 часов).

Ингибиторы накипеобразования использовались в дозах от 0,5 до 50 мг/дм³. После охлаждения пробы фильтровали и определяли остаточную жесткость воды.

Коэффициент упаривания рассчитывали как отношение начального объема (V_н) пробы к остаточному объему пробы (V_{ост}):

$$K_y = \frac{V_n}{V_{ост}}$$

Жесткость (Ж_н), остаточную жесткость в холостом опыте (Ж_к) и опытах с ингибиторами (Ж_и) определяли при анализе. Для расчета стабилизационного эффекта (СЭ) и противонакипного

эффекта (ПЭ) использовали рассчитанную теоретически начальную жесткость Ж_т:

$$Ж_t = Ж_n \cdot K_y,$$

где Ж_т – жесткость раствора, которая была бы после его упаривания без осаждения ионов жесткости.

Тогда:

$$СЭ = \left(1 - \frac{Ж_t - Ж_u}{Ж_t - Ж_k} \right) \cdot 100 \% = \left(1 - \frac{\Delta Ж_u}{\Delta Ж} \right) \cdot 100 \%$$

$$ПЭ = \frac{Ж_u}{Ж_t} \cdot 100 \%$$

Снижение жесткости (ΔЖ) определяли как разность между рассчитанной и измеренной жесткостью.

Как видно из табл. 2, ΔЖ в холостом опыте достигало 7,44 мг-экв/дм³.

Эффективность фосфоновых кислот в этих условиях была очень высокой. Уже при дозе 2 мг/дм³ ОЭДФК был достигнут стабилизационный эффект на уровне 99,2 %. Полная стабильность воды была достигнута при использовании НТМФК с цинком в концентрациях 2 – 10 мг/дм³.

Таблица 2. Оценка эффективности фосфоновых кислот по стабилизации водопроводной воды при её упаривании (t=40 °С)

Ингибитор	Доза, мг/ дм ³	[Ca ²⁺], мг-экв/дм ³	[Mg ²⁺], мг-экв/дм ³	Ж _н , мг-экв/дм ³	Ж _т , мг-экв/дм ³	Ж _к , мг-экв/дм ³	Ж _и , мг-экв/дм ³	ΔЖ _и (ΔЖ), мг-экв/дм ³	СЭ, %	ПЭ, %
—	—	4,8	2,8	1,64	12,46	5,02	—	(7,44)	—	—
ОЭДФК	2	9,4	3,0	1,64	12,46	5,02	12,40	0,06	99,20	99,52
	5	7,8	2,6	1,37	10,41	5,02	10,40	0,01	99,87	99,90
	10	7,2	3,2	1,39	10,56	5,02	10,40	0,16	97,85	98,48
	20	8,8	2,8	1,67	12,69	5,02	11,60	1,09	85,35	91,41
	50	7,2	2,4	1,39	10,56	5,02	9,60	0,96	87,10	90,91
НТМФК	2	8,4	1,2	1,50	11,40	5,02	9,60	1,80	75,80	84,21
	5	8,4	2,4	1,43	10,87	5,02	10,80	0,07	99,06	99,36
	10	8,6	2,8	1,52	11,55	5,02	11,40	0,15	97,98	98,70
	20	8,0	3,2	1,52	11,55	5,02	11,20	0,35	95,30	96,97
	50	7,6	1,8	1,39	10,56	5,02	9,40	1,16	84,41	89,02
НТМФК; Zn ²⁺	2;2	11,6	3,6	2,00	15,20	5,02	15,20	0,01	99,99	99,99
	5;2	7,1	3,6	1,47	11,17	5,02	11,20	0,01	99,99	99,99
	10;2	7,6	2,8	1,35	10,26	5,02	10,40	0,01	99,99	99,99
	20;2	8,2	2,2	1,40	10,64	5,02	10,40	0,24	96,77	97,74
	50;2	7,2	2,4	1,27	9,65	5,02	9,60	0,05	96,33	99,48

Практически во всех опытах получены высокие результаты по противонакипному эффекту. Увеличение дозы с 2 до 50 мг/дм³ практически не влияет на стабильность воды. Поэтому целесообразно использовать данные ингибиторы в дозах 2 – 5 мг/дм³.

Результаты по эффективности стабилизации воды с помощью разработанных фосфиновых кислот и полифосфатов приведены в табл. 3.

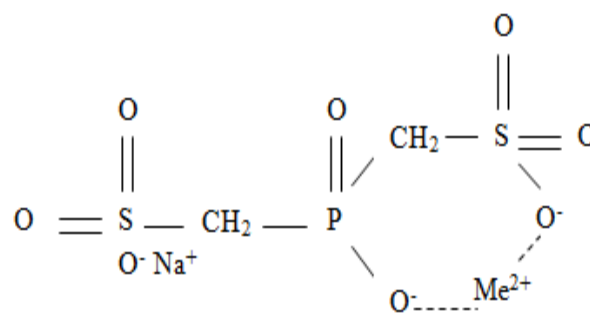
Таблица 3. Зависимость эффективности стабилизации водопроводной воды от типа и дозы полифосфатов и фосфиновых кислот при ее упаривании ($t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Ингибитор	Доза, мг/ дм ³	[Ca ²⁺], мг-экв/дм ³	[Mg ²⁺], мг-экв/ дм ³	Ky	Ж _т , мг-экв/дм ³	Ж _и (Ж _к), мг-экв/ дм ³	ΔЖ _и (ΔЖ) мг-экв/дм ³	СЭ, %	ПЭ, %
—	—	4,8	2,8	1,64	12,46	(5,02)	(7,44)	—	—
ТПФNa	2	8,0	3,0	1,45	11,02	11,00	0,02	99,73	98,82
	5	8,8	2,0	1,47	11,17	10,80	0,37	95,03	96,68
	10	8,0	3,2	1,46	11,10	11,20	0,01	99,9	99,9
	20	8,4	3,2	1,60	12,16	11,60	0,56	92,47	95,39
	50	8,4	2,8	1,54	11,70	11,20	0,50	93,28	95,73
ГМФNa	2	6,0	5,6	1,57	11,93	11,60	0,33	95,56	97,20
	5	8,0	2,4	1,39	10,56	10,40	0,16	97,85	98,48
	10	8,2	2,2	1,41	10,72	10,40	0,32	95,70	97,01
	20	7,6	3,2	1,46	11,10	10,80	0,30	95,97	93,30
	50	8,2	2,6	1,43	10,87	10,80	0,07	99,06	99,36
НДМСФК (I)	2	8,4	3,2	1,54	11,70	11,60	0,10	98,66	99,15
	5	7,6	3,0	1,43	10,87	10,60	0,27	96,37	97,52
	10	8,0	3,6	1,52	11,55	11,60	0,01	99,99	99,99
	20	8,4	3,0	1,49	11,32	11,40	0,01	99,99	99,99
	50	7,6	2,8	1,39	10,56	10,40	0,16	97,85	98,48
ДМФК(VIII)	2	6,0	3,0	1,72	13,07	9,00	4,07	45,30	68,86
	5	4,2	3,0	1,43	10,87	7,20	3,67	50,67	66,24
	10	4,8	3,6	1,50	11,40	8,40	3,00	59,68	73,68
	20	4,4	3,8	1,59	12,08	9,20	2,58	65,32	76,16
	50	4,0	3,2	1,25	9,50	7,20	2,30	69,09	75,79

Как видно из таблицы 3, полифосфаты – триполифосфат натрия и гексаметафосфат натрия, обеспечивают высокую стабильность воды по отношению к накипеобразованию при коэффициенте упаривания 1,39 – 1,64 в диапазоне концентраций ингибиторов от 2 до 50 мг/дм³. Уже при дозе 2 мг/дм³ стабилизационный эффект достигал 95,5 – 99,7%. Очень высокую эффективность обеспечивал стабилизатор накипеобразования НДМСФК (I). Степень защиты при дозах 2 – 50 мг/дм³ достигала 96,0 – 99,9%. Менее эффективной была ДМФК (VIII). Очевидно, высокая эффективность натриевой соли диметиленсульфонат фосфиновой кислоты обусловлено структурой молекулы, которая обеспечивает образование устойчивых хелатных структур с кальцием и магнием.

В данном случае возможно образование 6 –

ти членного цикла, который характеризуется высокой термодинамической стабильностью:



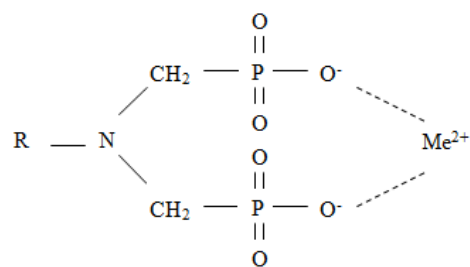
Образование подобных структур с диметилфосфиновой кислотой невозможно из-за низкой кислотности метилльных групп. Удовлетворительную эффективность обеспечивали полученные нами ингибиторы II–VII (табл. 4).

Таблица 4. Влияние сульфонатов на стабильность водопроводной воды при ее упаривании, $t=40\text{ }^{\circ}\text{C}$

Ингибитор	Доза, мг/дм ³	[Ca ²⁺] _{ост} , мг-экв/дм ³	[Mg ²⁺] _{ост} , мг-экв/дм ³	Ky	Жт, мг-экв/дм ³	Жн(Жк), мг-экв/дм ³	ΔЖн(ΔЖ), мг-экв/дм ³	СЭ, %	ПЭ, %
—	—	4,8	2,8	1,64	12,46	(5,02)	(7,44)	—	—
ТМСТК (III)	2	5,0	2,8	1,56	11,86	7,80	4,06	46,24	69,77
	5	7,5	2,9	1,52	11,55	7,90	4,15	44,22	64,07
	10	4,6	3,4	1,54	11,70	8,00	3,70	50,27	68,38
	20	4,8	2,8	1,43	10,87	7,60	3,27	56,05	69,92
	50	6,0	2,8	1,43	10,80	8,80	2,07	72,18	80,96
ТМСК (II)	2	4,0	3,2	1,43	10,87	7,20	3,67	50,67	66,24
	5	5,4	3,6	1,54	11,70	9,00	2,70	63,71	76,92
	10	7,2	3,6	1,52	11,55	10,80	0,75	89,92	92,31
	20	6,4	3,6	1,52	11,55	10,00	1,55	79,17	86,58
	50	4,8	3,4	1,45	11,02	8,20	2,82	62,10	74,41
ГМСМ (IV)	2	4,6	3,4	1,45	11,02	8,00	3,02	59,41	72,59
	5	7,7	3,1	1,47	11,17	10,30	0,37	95,30	96,69
	10	6,4	3,2	1,61	12,23	9,60	2,63	64,65	78,50
	20	5,0	3,0	1,39	10,56	8,00	2,56	65,59	75,76
	50	5,0	2,6	1,41	10,71	7,60	3,11	58,20	70,96
ГХТМСГ (V)	2	8,0	2,4	1,39	10,56	1,40	0,16	97,85	98,48
	5	6,0	3,0	1,47	11,17	9,00	2,17	70,83	80,57
	10	5,0	3,0	1,39	10,56	8,00	2,56	65,59	75,76
	20	4,8	3,6	1,45	11,02	8,40	2,62	64,78	76,23
	50	4,4	3,5	1,49	11,32	7,90	3,42	54,03	69,60
НДМССАН (VI)	2	4,0	2,8	1,41	10,71	6,80	3,91	47,45	63,49
	5	4,6	2,6	1,43	10,87	7,20	3,67	50,67	66,24
	10	4,0	3,2	1,39	10,56	7,20	3,36	54,84	68,18
	20	4,9	2,2	1,43	10,87	7,12	3,75	49,60	65,50
	50	8,4	1,6	1,45	11,02	10,00	1,02	86,56	90,74
НДМССАЦ (VII)	2	4,0	3,2	1,67	12,69	7,20	5,49	26,21	56,74
	5	5,0	3,0	1,39	10,56	8,00	2,56	65,59	75,76
	10	5,0	3,2	1,41	10,71	8,20	2,51	66,26	76,56
	20	4,9	3,0	1,33	10,11	7,90	2,21	70,30	78,14
	50	5,1	2,9	1,33	10,11	8,00	2,11	71,64	79,13

Как видно из табл. 4, лучшие результаты получены в случае тетраметилсульфонат карбамида – ТМСК (II) (СЭ = 50 – 90% при дозах от 2 до 10 мг/дм³), гексаметиленсульфонат меламина – ГМСМ (IV) (СЭ = 95% при дозе 5 мг/дм³) и гидрохлорид тетраметилсульфонат гуанидина – ГХТМСГ (V) (СЭ=98% при дозе 2 мг/дм³).

В целом, эффективность данных ингибиторов не очень высокая. Обусловлено это, возможно, тем, что в данном случае ингибиторы данного типа могут образовывать с катионами жесткости восьмичленные хелатные циклы, которые энергетически менее выгодны по сравнению с шестичленными, характерными для ОЭДФК или семичленными, характерными для НТМФК:



Кроме того, соединения II–VI термодинамически неустойчивые и при нагревании в разбавленных растворах могут частично разлагаться. Однако при низких температурах (30 – 40^oC) данные ингибиторы могут быть достаточно перспективными, учитывая их доступность и невысокую стоимость.

В таблице 5 приведены результаты по оценке эффективности НДМСФК (I) как стабилизатора накипеобразования при Ky от 1,45 до 2,63.

Таблица 5. Оценка эффективности НДМСФК (I) по стабилизации водопроводной воды при её упаривании при 40 °С

Доза мг/ дм ³	[Ca ²⁺], мг-экв/дм ³	[Mg ²⁺], мг-экв/дм ³	Ky	Ж _т , мг- экв/дм ³	Ж _и (Ж _к), мг-экв/дм ³	ΔЖ _и (ΔЖ), мг-экв/дм ³	СЭ, %	ПЭ, %
0	4,0	3,0	1,50	11,40	(7,0)	(4,40)	–	–
1	6,0	4,8	1,50	11,40	10,8	0,60	86,36	94,74
2	7,5	3,3	1,45	11,02	10,8	0,22	95,00	98,00
5	8,0	3,0	1,47	11,17	11,0	0,17	96,14	98,45
10	8,3	3,0	1,49	11,32	11,3	0,02	99,54	99,83
0	5,0	3,0	1,75	13,30	(8,0)	(5,30)	–	–
1	11,0	2,0	1,78	13,53	13,0	0,53	90,00	96,09
2	11,0	2,0	1,75	13,30	13,0	0,30	94,34	97,75
5	11,4	2,0	1,78	13,53	13,4	0,13	97,55	99,04
10	11,5	2,0	1,78	13,53	13,5	0,03	99,40	99,78
0	6,0	4,0	2,12	16,32	(10,0)	(6,32)	–	–
1	11,0	3,0	1,92	14,59	14,0	0,59	90,66	95,96
2	10,0	5,0	2,00	15,20	15,0	0,20	96,80	98,68
5	10,0	4,0	1,85	14,06	14,0	0,06	99,05	99,57
10	11,2	4,0	2,00	15,20	15,2	0,01	99,99	99,99
0	6,0	3,0	2,43	18,46	(9,0)	(9,46)	–	–
1	13,3	3,0	2,50	19,00	11,6	2,40	74,60	61,05
2	15,0	3,0	2,63	19,99	18,0	1,99	78,96	90,05
5	13,0	6,0	2,29	17,40	16,0	1,40	85,20	91,95
10	10,0	6,0	2,22	16,87	16,0	0,87	90,80	94,84

Как видно из таблицы 4, натриевая соль диметилсульфонат фосфиновой кислоты (НДМСФК) (I) эффективна как ингибитор накипобразования при различных коэффициентах упаривания. Так при коэффициенте упаривания 2,00 и дозе 2 мг-экв/дм³ стабилизационный эффект достигал – 96,80 %, при Ky=2,22 – 2,63 при дозах 1 – 10 мг/дм³ СЭ достигал 74 – 90 %.

Заключение

Таким образом, из приведенных результатов видно, что полученные простыми методами из доступных реагентов сульфаты весьма эффективны как ингибиторы накипобразования при температурах до 60°C, а производные диметилсульфонат фосфиновой кислоты не уступают по эффективности лучшим ингибиторам накипобразования – ОЭДФК и НТМФК при температурах от 40 до 100°C при коэффициенте упаривания до 2,63.

Список литературы

1. Kuznetsov Yu.I. Organic inhibitors of corrosion of metals / Yu.I. Kuznetsov // Plenum Press: New York and London. – 1996. – P. 201–209.
2. Машанов А.В. Обработка воды в системе теплоснабжения фосфонатами / А.В. Машанов., Я.М. Щелоков, Р.Д. Зускович, Г.Ш. Раменский, В.А.

- Игнатов // Энергетик. – 1990. – № 4. – С. 14–15.
3. Кузнецов Ю.И. О защите стали оксиэтилендифосфонатами при повышенных температурах / Ю.И. Кузнецов, В.А. Исаев, Н.В. Нестерова // Журнал прикладной химии. – 1990. – Т. 63, № 11. – С. 2441–2445.
4. Феденко А.Н. Применение полифосфата натрия в химической водоподготовке / А.Н. Феденко // Новости теплоснабж. – 2002. – № 11. – С. 29–30.
5. Зинченко Г.В. Об особенностях ингибирования коррозии стали в горячей воде смесями оксиэтилендифосфонатов с нитритом натрия / Г.В. Зинченко, Ю.И. Кузнецов // Коррозия: материалы, защита. – 2005. – № 8. – С. 25–30.
6. Кузнецов Ю.И. Роль природы лиганда в ингибировании коррозии металлов фосфонатами / Ю.И. Кузнецов, А.Ф. Раскольников // Защита металлов. – 1992. – Т. 28, № 5. – С. 707–724.
7. Реагентная обработка оборотной воды Дрогобычского нефтеперерабатывающего завода / [В.Ф. Сороченко, В.В. Назаренко, Я.Б. Козликовский и др.]. – Киев: Политехн.ин-т., 1989. – 12 с.
8. Пат. 6207079 США, МКИ⁷ С 09 К 3/00. Scale and/or corrosion inhibiting composition / Kmec Pavol, Emirich Dwight E.; заявитель и патентообладатель Ashland Inc. – № 09/238850; заявл. 28.01.99; опублик. 27.03.01.
9. Пат. 2780722 Франция, МПК⁷ С 02F 5/10. Composition inhibitrice d'entartrage et de corrosion de circuits d'eau / Francis Moran; № 9807918; заявл. 23.08.98; опублик. 23.06.98.
10. Гомеля М.Д. Зниження корозійної агресивності

води при її пом'якшенні / М.Д. Гомеля, Т.О. Шаблій, Т.С. Тищенко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 1999. – № 1. – С. 156–160.

References

1. Kuznetsov Yu.I. Organic inhibitors of corrosion of metals, Plenum Press: New York and London, 1996, pp. 201–209.
2. Mashanov A.V. et al. *Obrabotka vody v sisteme teplosnabzheniya fosfonatami* [Water treatment in the heat supply system with phosphonates], *Ehnergetik*, 1990, No 4, pp. 14–15.
3. Kuznecov Yu.I., Isaev V.A., Nesterova N.V. *O zashchite stali oksiehtilendifosfonatami pri povyshennykh temperaturakh* [On the protection of steel by oxyethylene diphosphonates at elevated temperatures], *Zhurnal prikladnoy khimii*, 1990, Vol. 63, No 11, pp. 2441–2445.
4. Fedenko A.N. *Primenenie polifosfata natriya v khimicheskoy vodopodgotovke* [The use of sodium polyphosphate in chemical water treatment], *Novosti teplosnabzh*, 2002, No 11, pp. 29–30.
5. Zinchenko G.V., Kuznecov Yu.I. *Ob osobennostyakh ingibirovaniya korrozii stali v goryachej vode smesyami oksiehtilendifosfonatov s nitritom natriya* [On the features of corrosion inhibition of steel in hot water by mixtures of oxyethylidene diphosphonates with sodium nitrite], *Korroziya: materialy, zashchita*, 2005, No 8, pp. 25–30.
6. Kuznecov Yu.I., Raskol'nikov A.F. *Rol' prirody liganda v ingibirovanii korrozii metallov fosfonatami* [The role of the nature of the ligand in the inhibition of corrosion of metals by phosphonates], *Zashchita metallov*, 1992, Vol. 28, No 5, pp. 707–724.
7. *Reagentnaya obrabotka oborotnoj vody Droghobyskogo neftepererabatyvayushchego zavoda* [Reagent treatment of circulating water of the Drohobych oil refinery], V.F. Sorochenko, V.V. Nazarenko, YA.B. Kozlikovskij i dr., Kiev: Politekh.in-t, 1989, 12 p.
8. Kmec Pavol, Emirich Dwight E. (1999) Scale and/or corrosion inhibiting composition. US Patent 6207079B1.
9. Francis Moran (1998). Composition inhibitrice d'entartrage et de corrosion de circuits d'eau. FR Patent 2780722B1.
10. Gomelya N.D., Shablij T.A., Tishchenko T.S. *Snizhenie korroziionnoj agressivnosti vody pri ee umyagchenii* [Reducing the corrosiveness of water during softening]. Kiev: Nauchnye vesti NTUU "KPI", 1999, No 1, pp. 156–160.

УДК 579. 222

Исследование трансформации органического вещества, выделенного из листового опада

И.М. Цымбал, Г.В. Кучерик

*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, Galina_kucherik@mail.ru*

Статья поступила 21.04.2021 г.; после доработки 23.04.2021 г.

Аннотация

В статье изучены результаты экспериментальных работ по трансформации индивидуальных органических веществ, выделенных листовым опадом в водную среду. Выявлены начальные процессы формирования веществ гуминовой природы.

Ключевые слова: гумификация, лигнин, листовый опад, углеводы, фенольные соединения.

Research on the transformation of organic matter, isolated from leaf litter

I.M. Tsymbal, G.V.Kucherik

*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
Galina_kucherik@mail.ru*

Received 21.04.2021 y.; received in final form 23.04.2021 y

Abstract

The article gives the results of experimental research on transformation of the individual organic substances allocated from abscised leaves to water environment. The initial processes of forming humic nature substances are educed.

Keywords: humification, lignin, leaf litter, carbohydrates, phenolic compounds.

Введение

Содержание и запасы органического вещества в почвах служат основными критериями оценки почвенного плодородия, а в последние годы все больше рассматриваются и с точки зрения экологической устойчивости почв как незаменимого компонента биосферы.

Исходным материалом для образования гумуса, являющегося не только источником повышения плодородия почв, но и запаасающим материалом для жизнедеятельности живых организмов, являются отмершие растительные остатки, которые образуются в конце каждого вегетационного периода.

Они формируют геохимические потоки органических веществ в водных экосистемах, выполняют протекторную функцию, связывая путем сорбции ионы токсичных металлов, пестициды, углеводороды, фенолы, предотвращая, таким образом, поступление их в подземные воды и поверхностные водоемы.

Велико их значение и в стимулировании физиологических функций путем повышения продуктивности растений и животных, в том числе, и сельскохозяйственных.

Учитывая разнообразие роли гуминовых веществ, по мнению Д.С. Орлова [1,2], процессы гумификации растительных остатков могут представлять интерес не только для агрономов,

но и для специалистов лесного и паркового хозяйства и для специалистов-экологов, поскольку от этих процессов зависит устойчивость и стабильность водных и наземных экосистем.

Процессам гумификации предшествует разложение отмерших растительных остатков и выход во внешнюю среду индивидуальных органических веществ, той иной степени сложности. Разложение растительных остатков проходит в несколько этапов. Но при этом одновременно проходят как реакции гидролиза и окисления выделившихся органических веществ, так и реакции полимеризации и конденсации, характерные для образования гуминовых веществ. В силу всех преобразований, происходящих с органическим веществом, одновременно проследить процессы их деструкции и динамику трансформации в соединения гуминовой природы практически не представляется возможным. Поэтому, излагаемые результаты настоящих исследований, являются продолжением уже опубликованных нами материалов [3] по деструкции растительного опада.

Целью работы было изучение трансформации органических веществ, выделенных листовым опадом в водную среду, а также выявление начальных процессов формирования веществ гуминовой природы.

Задачи исследования состояли в планировании проведения экспериментов и выборе индивидуальных параметров изучения динамики преобразования органических веществ; определении калибровочных зависимостей между концентрацией определяемых параметров и оптической плотностью; отборе проб и определении покомпонентного содержания индивидуальных органических соединений.

Описание исследования

Исследование процессов трансформации выделившегося из растительных остатков органического вещества изучали в растворе на примере, наиболее представленных в нем индивидуальных соединений: углеводов, лигнинов и веществ фенольной природы. Кроме них определяли динамику образования гуминоподобных веществ. Для определения содержания всех выделенных компонентов применяли колориметрические методы, которые основаны на способности индивидуальных соединений поглощения определенной части видимого спектра, то есть определения оптической плотности растворов, отдельных индивидуальных органических веществ. Для определения оптической плотности

использовали фотоэлектроколориметр КФК-3-01-«ЗОМЗ». Расчет концентраций органических соединений в отбираемых пробах производили по калибровочным коэффициентам, рассчитанным по калибровочным кривым для каждого из веществ.

Определение суммарного содержания углеводов производили общепринятым методом с L-триптофановым реактивом [4], механизм которого заключается во взаимодействии веществ углеводной природы с L-триптофаном, с образованием окрашенных комплексов, максимум оптической плотности которых приходится на 540 нм. Калибровочную кривую строили по сахарозе марки чда. Выявление фенолов в растворе основывается на образовании их окрашенных производных с 4-аминоантипирином. Оптическую плотность, образованных аминопириновых оснований, определяли при длине волны 460 нм и рассчитывали по калибровочным концентрациям фенолкарбоновой кислоты. Для определения содержания лигнина использовали его свойство образовывать нитрозопроизводные, максимум поглощения которых приходится на 430 нм [4]. Гуминовые вещества осаждали из водного раствора и экстрагировали из образовавшегося осадка 0,5 % раствором NaOH, оптическую плотность определяли при длине волны 465 нм. Содержание гуминовых веществ рассчитывали по формуле:

$$C = \frac{(E_n - E_k) \cdot V \cdot p}{(0,053 \cdot 100) \cdot m},$$

где C – концентрация в %;

E_n и E_k – оптическая плотность соответственно пробы и контроля;

V – объем пробы;

p – разведение пробы;

(0,053·100) – коэффициент, численно равный оптической плотности пробы, содержащей 1 мг гуминовых веществ в 100 мл раствора;

m – масса пробы.

Результаты исследования

Наблюдения за преобразованием органического вещества производили в водной вытяжке из листового опада, представленной определенным пулом индивидуальных органических соединений. Серия экспериментов по динамике преобразования органических веществ продолжалась в течение четырех месяцев, с периодичностью отбора проб два раза в месяц. Всего за время про-

ведения эксперимента было отобрано и проанализировано семь проб водной вытяжки. Точкой отсчета наблюдений послужили начальные концентрации определяемых компонентов. В начале эксперимента в водной вытяжке концентрация углеводов составила 265 мг/л. Содержание фенольных соединений было примерно в 10 раз ниже, а их концентрация не превышала 27 мг/л. Вещества гуминовой природы присутствовали в матричном растворе в незначительном количестве.

В ходе экспериментов было выявлено, что за весь период наблюдения, произошло перераспределение выделенных органических соединений, часть из которых осталась в растворе, а часть перешла во взвешенное состояние, выпав в виде коллоидного геля на дно сосудов. Сухая масса образовавшегося осадка колебалась от 1,1 до 1,5 г.

Ход кривых изменения содержания определяемых индивидуальных органических соединений, полученных по результатам анализа семи отобранных проб, показывает разную динамику изменения их концентраций в растворе.

Процесс трансформации растворенных углеводов, как видно из рисунка 1, стабилизировался к середине эксперимента. Их концентрация в первой половине наблюдений постепенно снижалась и в четвертой пробе составила около 60 % от начального содержания. В трех последующих пробах изменение содержания растворенных углеводов не происходит, что может свидетельствовать о том, что их преобразование прекращается или приостанавливается.

Динамика фенольных соединений в ходе проведения опытов также претерпевает существенные изменения. Она также как и динамика

углеводов наиболее выражена в первой половине экспериментов (рис. 1). Однако кривые, характеризующие изменения их концентраций, носят прямо противоположный характер, поскольку содержание фенольных соединений в растворе в первой половине наблюдений существенно увеличивается и в четвертой пробе достигает 18 мг/л, что превышает начальную концентрацию в 4 раза.

Характер изменения содержания лигнина в растворе сходен с характером динамики углеводов. Отличие кривых, отображающих их динамику, состоит в том, что снижение концентрации лигнина менее выражено, чем углеводов. Их концентрация стабилизируется также как углеводов и фенолов на уровне четвертой пробы от начала наблюдений. Падение же содержания лигнина в ходе экспериментов незначительно и к концу эксперимента не превышает 10 %.

В водной вытяжке из листового опада к началу эксперимента по трансформации органических соединений было обнаружено некоторое количество гуминоподобных веществ, которые, по-видимому, явились результатом преобразования выделенных листьями органических веществ. В ходе проведения экспериментов по трансформации органического вещества, форма кривой динамики гуминоподобных веществ отличается от формы кривых динамики других органических соединений (рис. 2). В первой половине эксперимента концентрация гуминоподобных веществ медленно возрастает на 10–20 %. Во второй половине – содержание предшественников гуминовых веществ увеличивается по сравнению с начальным периодом на 55–60 %.

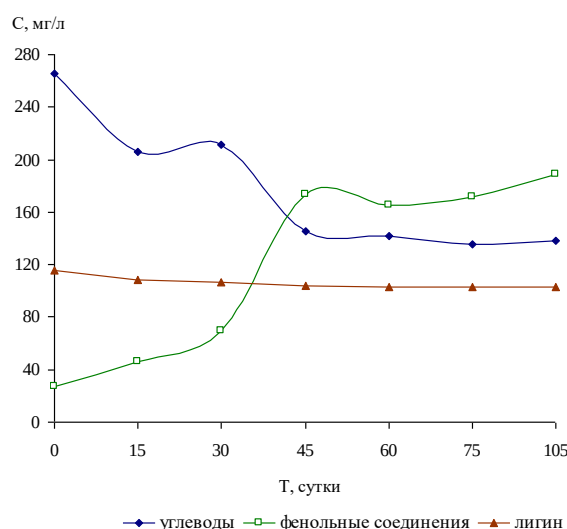


Рис. 1. Динамика изменения растворенных углеводов, фенольных соединений и лигнина.

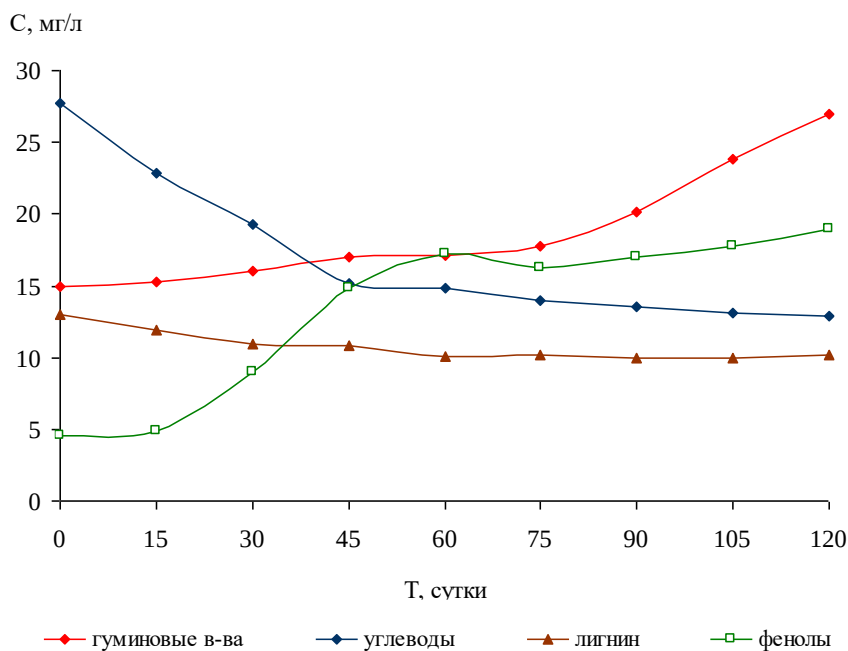


Рис. 2. Динамика преобразования определяемых компонентов в растворе

По мере наблюдения трансформации отдельных веществ выявлено, что изменение содержания лигнинов в сторону уменьшения происходит наиболее плавно по сравнению с динамикой преобразования двух других органических веществ (рис. 2). Их концентрация снизилась к концу эксперимента примерно на 10 % по сравнению с начальной концентрацией.

Кривая динамики углеводов подобна ходу кривой динамики лигнина. Однако снижение концентрации за период наблюдений было более выраженным и составило около 50 % от начальной концентрации. Начало резкого снижения концентрации углеводов до 55 % обнаружено в пробах, отобранных после первого месяца наблюдений. На протяжении всего оставшегося периода снижение составило всего около 5 % от начальной концентрации. На начальном этапе экспериментов содержание фенольных соединений в составе водной вытяжки было самым низким, постепенное повышение их содержания происходит в первый месяц наблюдений и к середине эксперимента достигает 170 мг/л, что в 6 раз превышает начальную концентрацию.

Таким образом динамика преобразования органического вещества, выделенного из листового опада в рамках изучаемых отдельных классов соединений, свидетельствует о том, что в ходе проведения эксперимента продолжительностью четыре месяца, содержание углеводов и

лигнинов снизилось, а содержание фенольных соединений и гуминоподобных веществ увеличилось. Эти изменения в содержании органических веществ являются, по-видимому, следствием их трансформации, связанных с процессами деструкции и полимеризации, механизмы которых выявить достаточно сложно.

Интерес в процессе преобразования органических веществ представляет сформировавшийся к середине эксперимента биоценоз живых организмов, характерный для умеренно загрязнённых пресных вод, представленный инфузориями (*Calpidium calpoda*), коловратками (*Phylodina roseola*) и олигохетами рода *Aelosoma*. Эти же организмы в симбиозе с бактериями являются типичными представителями «активного ила» очистных сооружений биологической очистки. Они активно питаются низкомолекулярными растворёнными органическими веществами, что может указывать на причину снижения растворённых углеводов. К концу экспериментов большая часть микроорганизмов погибла, а остальные образовали споры. Причиной этому, с одной стороны, могло послужить увеличение фенольных соединений, которые являются сильными антисептиками, а с другой – недостаток растворённого кислорода.

Из рис. 3 видно, что динамика изменения реакции среды при трансформации органических веществ имеет стабильный характер.

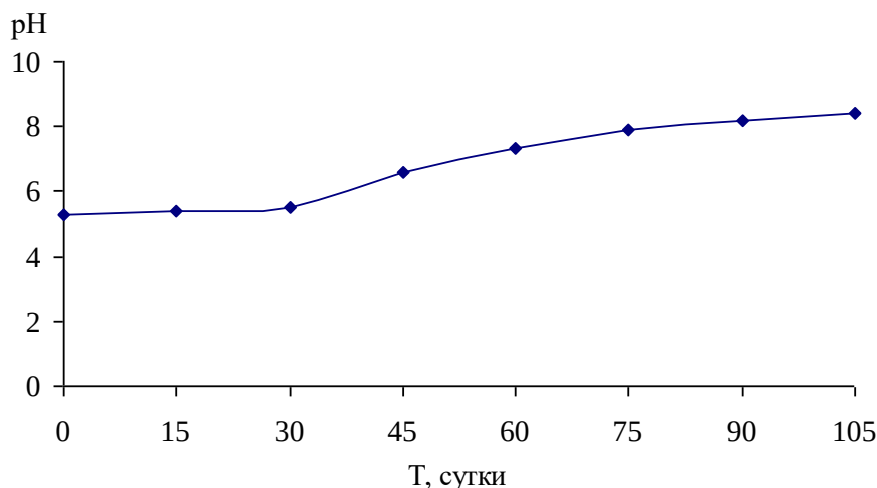


Рис. 3. Динамика уровня pH при трансформации органического вещества

На протяжении эксперимента наблюдается все-таки тенденция к подщелачиванию раствора. Рост уровня pH среды происходит стабильно на протяжении всего эксперимента, за исключением небольшого скачка, который произошёл примерно к концу второго месяца. В общем, за всё время проведения опытов значение pH повысилось от 5,3 до 8,4 единиц.

В процессе эксперимента на дне сосудов образовалось некоторое количество осадка типа

детрита в виде геля. Для определения биохимического состава осадка, его отделяли от водной фазы и высушивали. Сухая масса, образовавшегося на протяжении 120 суток осадка, составила $1,1 \div 1,7$ г. По составу осадок состоит из лигнина, углеводов, гуминоподобных веществ и фенольных соединений. Их процентное соотношение показано на рис. 4.

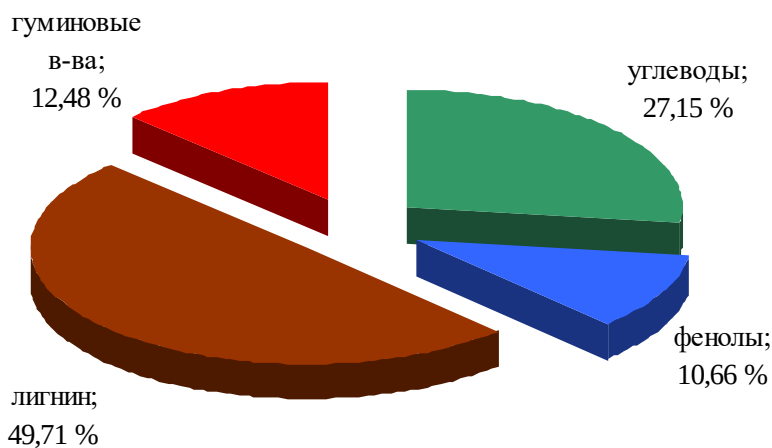


Рис. 4. Динамика преобразования определяемых компонентов в детрите

Преобладающим компонентом детрита является лигнин (50 %), содержание которого колеблется от 40 до 66 мг/г в разных повторностях, что соответствует 50 и 39 % от суммарного содержания определяемых органических веществ. Углеводы являются вторым компонентом по значимости в составе осадка, их концентрации составляют $22 \div 50$ мг/г, что соответствует 27 и 29 % от суммарного содержания определяемых органических веществ.

Наименьшая доля в составе осадка приходится на фенольные соединения. Их содержание колеблется в пределах $8,5 \div 13$ мг/г, что соответствует 11 и 8 % суммарного количества определяемых компонентов.

Однозначно оценить содержание гуминоподобных веществ не представляется возможным: в одной повторности их значение составляло 5,7 мг/г, а в другой – 35 мг/г, что соответствует 12 и

24 % и свидетельствует, по-видимому, об участии дополнительных факторов в их образовании.

Заключение

1. В течение 4 месяцев избыточного переувлажнения деструкции подвергается около 40 % листового опада.

2. В водную среду выделяется около 90 % лигнинов, 80 % углеводов и 70 % фенольных соединений от общего содержания этих веществ в листовом опаде.

3. Преобразование выделенных органических веществ выражается в уменьшении концентрации углеводов и лигнинов, в увеличение содержания фенольных соединений и появлении веществ гуминовой природы, отсутствующих в составе листового опада.

4. В ходе изучения трансформации органического вещества листового опада обнаружен биоценоз живых организмов, характерный для умеренно загрязнённых пресных вод.

5. Часть выделенных органических веществ трансформировалась в гелеобразный осадок, представленный лигнинами, углеводами и фенольными соединениями с примесью веществ гуминовой природы, относящийся к типу анмор.

Список литературы

1. Орлов Д.С. Кинетическая теория гумификации и схема вероятного строения гуминовых кислот. // Научные докл. Высш. школы. Биол. Науки, 1977. – № 9. – С. 5-16.
2. Орлов Д.С. Гумусовые кислоты почв / Д.С. Орлов. – М.: Изд-во Моск. Ун-та, 1974. – 335 с.
3. Цымбал И.М., Кучерик Г.В. Исследование начального процесса гумусообразования из листового опада в условиях избыточного увлажнения / Энергетические установки и технологии. – 2021. – Т. 7, № 1. – С. 154-160.
4. Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. – М.: ВНИРО, 1988. – 119 с.

References

1. Orlov D.S. *Kineticheskaya teoriya gumifikatsii i skhema veroyatnogo stroeniya guminovykh kislot* [Kinetic theory of humification and scheme of the probable structure of humic acids] Nauchnye dokl. Vyssh. shkoly. Biol. Nauki, 1977, No 9, pp. 5-16.
2. Orlov D.S. *Gumusovye kisloty pochv* [Humic acids of soils], Moscow, MSU, 1974, 335 p.
3. Cymbal I.M., Kucherik G.V. *Issledovaniye nachal'nogo protsessa gumusoobrazovaniya iz listovogo opada v usloviyakh izbytochnogo uvla-*

zhneniya [Investigation of the initial process of humus formation from leaf litter in conditions of excessive moisture], *Energeticheskiye ustanovki i tekhnologii*, 2021, Vol. 7, No 1, pp. 154-160.

4. *Metody gidrohimicheskikh issledovaniy os-novnykh biogennykh elementov* [Methods of hydrochemical research of the main biogenic elements], Moscow, VNIRO, 1988, 119 p

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 7 № 2**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 7 No 2**

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 10.06.2021. Изд. № 11/21. Зак. 17/21. Тираж 65 экз.
Объем 25 п.л. Усл. печ. л. 23,25. Уч.-изд. л. 24,5. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»