

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 4 № 3

**Севастополь
2018**

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2018. – Т. 4. - № 3. – 100 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;
Магдыч Е.А., к.т.н., доцент; *Федорова С.А.*, к.пед.н., доцент;
Мирошниченко С.Т., к.т.н., доцент; *Свириденко И.И.*, к.т.н., доцент;
Матузаев К.Б., к.т.н., доцент; *Скидан А.А.*, к.т.н., доцент;
Углов А.В., к.т.н., доцент; *Шайтор Н.М.*, к.т.н., доцент;
Ерофеев В.А., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И.*, к.т.н., доцент;
Гусева Е.В., к.т.н., доцент; *Щекатурина Т.Л.*, д.х.н., доцент

Учредитель и издатель:

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

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	5
<i>Качур С.А.</i> Дистанционная нейтрализация продуктов распада уран-ториевого цикла на основе эффекта искривления пространства	5
<i>Мороз Н.А., Замыслова Т.Н., Чупрынин С.А., Магдыч Е.А., Винниченко В.В.</i> Оценка возможности применения различных реагентов для растворения кристаллической фазы в емкостях ХЖО на АЭС с реакторами ВВЭР-1000	10
<i>Пухлий В.А., Коган Е.А., Пухлий К.В.</i> Основные соотношения дифференциальной геометрии для крышки ядерного реактора при расчетах на прочность	16
Автоматизация процессов контроля и управления	24
<i>Качур С.А.</i> Прогнозирование режимов кипения в парогенерирующем канале на основе спектрального анализа акустических шумов	24
<i>Кузнецова Н.И., Нурзай В.А., Ямпольский И.С.</i> Анализ и оценка работоспособности основных элементов АСУ ТП АЭС на основе тестового диагностирования	30
<i>Широков И. Б., Марончук И. И.</i> Разработка электронных блоков микроволнового измерителя содержания воды в нефти и нефтепродуктах	35
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	45
<i>Кувишинов В.В., Антонович И.А., Раханский Д.А., Вейсова С.З.</i> Некоторые результаты исследования солнечных установок для обеспечения автономных потребителей в удалённых районах	45
<i>Кузнецов П.Н., Гусева Е.В., Борисов А.А.</i> Современное состояние и направления развития фотоэлектрических энергоустановок	51
<i>Новых А.В., Мендес Перез Х.А., Гонзалес-Диас Б., Свириденко И.И., Гоголев Г.В., Тимофеев В.А.</i> Повышение эффективности гибридных электростанций с помощью аккумулирующих устройств	58
<i>Титаренко О.Н.</i> Анализ способов выравнивания суточных графиков нагрузки	67
Экологическая безопасность	74
<i>Мороз Н.А., Лунева Е.В., Чупрынин С.А., Замыслова Т.Н., Мирошниченко А.С.</i> Требования к разделу проектной документации «Перечень мероприятий по охране окружающей среды» с учетом изменений в законодательстве и опыта государственных экспертиз	74
Химические технологии	86
<i>Акимов А.М., Котельникова С.А.</i> Специфика интегрированных мембранных технологий в сочетании с ионным обменом для целей водоподготовки	86
<i>Черкашина Н.И.</i> Выбор комбинации фильтрующего материала в зависимости от технологических параметров процесса и очищаемой среды	92
Для авторов	98

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	5
<i>Kachur S.A.</i> Controlled from Distance Neutralization of Products of Disintegration of Uranium-thorium Cycle on the Basis of Effect of Curvature of Space	5
<i>Moroz N.A., Zamislova T.N., Chuprinin S.A., Magdych E.A., Vinnichenko V.V.</i> Assessment of possibility of application of different chemicals used to dissolve crystalline phase storage capacities of NPP with VVER-1000	10
<i>Pukhliy V.A., Kogan E.A., Pukhliy K.V.</i> The basic parities of differential geometry for the cover of nuclear reactor at calculations durability	16
Process automation and control	24
<i>Kachur S.A.</i> Prognostication of the Conditions of Boiling in Steam Generating Channel on the basis of Spectral Analysis of Acoustic Noises	24
<i>Kuznetsova N.I., V.A. Nurzai V.A., Yampolskiy I.S.</i> Analysis and assessment of the operability of the main elements of automated control systems for technological processes at NPP based on test diagnostics	30
<i>Shirokov I. B., Maronchuk I. I.</i> Development of electronic blocks of a microwave measuring instrument for water content in oil and oil products	35
Alternative and renewable energy sources	45
<i>Kuvshinov V.V., Antonovich I.A., Rakhansky D.A., Weisova S.Z.</i> Some results of the study of solar installations for providing autonomous consumers in remote areas	45
<i>Kuznetsov P.N., Guseva E.V., Borisov A.A.</i> Current state and development trends of photovoltaic power plants	51
<i>Novykh A.V., Mendez Perez J.A., Gonzalez-Diaz B., Sviridenko I.I., Gogolev G.V., Timofeev V.A.</i> Increasing the efficiency of hybrid power plants using accumulating devices	58
<i>Titarenko O.N.</i> Analysis of methods of smoothing of the daily allowance load-graphs	67
Environmental safety	74
<i>Moroz N.A., Luneva E.V., Chuprinin S.A., Zamislova T.N., Miroshnichenko A.S.</i> Requirements to the project documentation section «Measures list for environmental protection» taking into account changes in legislation and state examinations experience	74
Chemical technology of nuclear power plants	86
<i>Akimov A.M., Kotelnikova S.A.</i> Specifics of integrated membrane technologies in combination with ion exchange for water treatment purposes	86
<i>Cherkashina N.I.</i> Select the combination of filter material depending on the technological parameters of the process and clean up the environment	92
For cars	98

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

Дистанционная нейтрализация продуктов распада уран-ториевого цикла на основе эффекта искривления пространства

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 31.08.2018 г.; после доработки 10.09.2018 г.

Аннотация

Предложен подход к дистанционной нейтрализации продуктов деления уран-ториевого ядерного цикла на основе эффекта искривления пространства вокруг реактора. Энергия излучения продуктов деления в состоянии реактора вблизи мгновенной критичности преобразуется в энергию деформации пространства, создающей пространственно-временной монополю реактора.

Ключевые слова: уран-ториевый цикл, реактор, искривление пространства, пространственно-временной монополю.

Controlled from Distance Neutralization of Products of Disintegration of Uranium-thorium Cycle on the Basis of Effect of Curvature of Space

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 31.08.2018 y.; received in final form 10.09.2018 y.

Abstract

Offered approach to the controlled from distance neutralization of products of division of uranium-thorium nuclear cycle on the basis of effect of curvature space about a reactor. Energy of radiation of products of division in a state of reactor near-by instantaneous criticism will be transformed in energy of deformation of space, creating spatio-temporal monopole of reactor.

Keywords: uranium-thorium cycle, reactor, curvature of space, spatio-temporal monopole.

Введение

В 50-70-е годы в ряде стран мира (США, Великобритания, Индия, ФРГ, СССР и др.) проводились различные эксперименты с ториевыми и торий-урановыми реакторами.

В 70-80-е годы американская компания General Atomics и немецкая Siemens даже создали опытные образцы энергетических реакторов мощностью 300 МВт с использованием ториевого топлива, однако на этом исследования в

данной области практически полностью прекратились [1-4].

Падение интереса к торию было обусловлено рядом объективных и субъективных причин. Прежде всего, фундаментальным недостатком тория была его непригодность для производства ядерного оружия. В 50-е годы в США проводились опыты по использованию урана-233 в ядерных бомбах. Сильное отклонение реальной силы взрыва от реальной свидетельствует о

протекании многочисленных паразитных реакций, уменьшающих энергетический выход. Применение ^{233}U для производства атомных бомб в США и СССР было признано бесперспективным.

Вследствие этого адекватной технологии изготовления ториевых или торий-урановых топливных элементов так и не было создано. Не была решена и главная проблема ториевого цикла. В ходе реакций, помимо урана-233, образовывалось небольшое количество (порядка десятых долей процента) урана-232 – короткоживущего изотопа, распад которого приводил к появлению очень опасных радиоактивных «обломков». Технология переработки отработанного уран-плутониевого цикла существует и хорошо отработана, для уран-ториевого цикла такая технология отсутствует.

Представляется, что нейтрализация продуктов распада уран-ториевого цикла может быть решена посредством отдачи энергии урана-233 и радиоактивных «обломков» на искривление пространства вокруг реактора, т.е. на создание пространственно-временного монополя, образующего черную дыру.

Пространственно-временной монополь скрытой сингулярности (черной дыры) имеет дискообразную форму с системой реакторов (реактором) в центре. Существует некоторая аналогия структуры между пространственно-временным монополем реактора и сверхтяжелым монополем (GUT-монополем) [5]. Монополь реактора как монополь скрытой сингулярности включает четыре зоны: центральная область – зона коллапса; зона сжатия с замедлением времени в соответствии с ОТО; зона задержки времени, которая позволяет вернуться во времени назад; зона расширения с ускорением течения времени в соответствии с ОТО.

Предлагаемая статья является продолжением исследований возможностей применения пространственно-временных эффектов, порождаемых урановым ядерным реактором в состоянии близком к мгновенной критичности [5-7], но для случая ториевого реактора.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – создание подхода для дистанционной нейтрализации продуктов деления уран-ториевого цикла на основе эффекта искривления пространства.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) анализ достоинств и недостатков уран-ториевого цикла;
- 2) сравнение возможностей использования уран-плутониевых и уран-ториевых реакторов для искривления пространства;
- 3) определение основных параметров системы электромагнитного управления мощностью уран-ториевого реактора в состоянии вблизи мгновенной критичности.

Перспективы создания уран-ториевых энергетических и транспортных реакторов

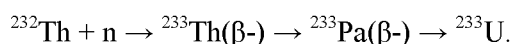
В настоящее время в мире нет ни одного действующего ториевого реактора.

В современной ядерной энергетике известны два основных топливных цикла – уран-плутониевый и уран-ториевый. Первый основывается на реакциях деления ^{235}U и синтеза делящегося ^{239}Pu из ^{238}U , а второй – на делении ^{233}U (на старте используется ^{235}U) и синтезе делящегося изотопа ^{233}U из ^{232}Th [2, 3].

Накопленный опыт с использованием в энергетике уран-плутониевого цикла выявил ряд негативных моментов. Прежде всего оказалось, что современная ядерная энергетика не безопасна. Кроме того, существуют проблемы с переработкой отработанного ядерного топлива и с захоронением отходов.

Перечисленные проблемы решаются при переходе на уран-ториевый топливный цикл в безтвэльных реакторах. Такой реактор имеет низкий запас реактивности и отрицательный температурный коэффициент реактивности, что полностью обеспечивает ядерную безопасность.

Возможность уран-ториевых топливных циклов доказано ещё в начале 40-ых годов прошлого века. После многих лет интенсивных исследований о возможности использования тория в атомной энергетике все работы были прекращены, и было признано, что мечта о «безопасной» ториевой энергетике – нереальна. Как известно, ^{232}Th способен как к самопроизвольному, так и к вынужденному делению быстрыми нейтронами (с энергией более 1 МэВ), хотя сечение этой реакции не велико. Однако тепловыми нейтронами он не делится, что не позволяет организовать на тории цепной процесс деления. Для целей атомной энергетике, однако, можно воспользоваться тем фактом, что при захвате теплового нейтрона ^{232}Th превращается в ^{233}U по схеме:



Изотоп ^{233}U делится тепловыми нейтронами и способен поддерживать цепное деление. По одному из существенных показателей ^{233}U превосходит ^{235}U и ^{239}Pu , имея более высокий выход нейтронов на один поглощенный нейтрон.

Выделим одну из причин, которая определяет перспективность использования ториевых реакторов не только для атомных станций, но и для надводных судов и подводок.

Ядерные реакторы на ториевом топливе более безопасны, чем на урановом, поскольку ториевые реакторы не обладают запасом реактивности. Поэтому никакие разрушения аппаратуры реактора не способны вызвать неконтролируемую цепную реакцию.

Все современные реакторы работают по схеме выжигания активной компоненты топлива (^{235}U , ^{239}Pu) в активной зоне: в них первоначально закладывается активного материала больше, чем это требуется для непосредственного поддержания критического уровня. Стационарное положение стабилизируется стержнями, поглощающими нейтроны. Поэтому ни один из ныне существующих реакторов, работающих по принципу выгорания, нельзя отнести безопасным, т.к. извлечение регулирующих стержней из активной зоны повлечет перевод реактора в надкритическое состояние.

Кроме того, урановый реактор слабо защищен даже от мощной взрывной волны, порожденной взрывом вблизи него. Рост реактивности может привести к неконтролируемой ядерной реакции, с которой не справится никакая система управления и защиты реактора.

Преимуществом ториевых реакторов является их неспособность по своей физической природе привести к ядерному взрыву. Реактор можно разрушить до основания, но он никогда не взорвется подобно чернобыльскому.

С точки зрения переработки топлива ториевый цикл обладает некоторыми недостатками. В процессе выгорания в топливе накапливается изотоп ^{232}U , в цепочке распада которого в свинец присутствуют изотопы ^{210}Bi (γ -излучение с энергией 1,6 МэВ), ^{212}Po (γ -излучение с энергией 2,6 МэВ) и особенно неприятный изотоп ^{208}Tl (энергия γ -частиц 2,6 МэВ). Работа с таким облученным топливом требует развития технологий дистанционной переработки и изготовления топлива. Кроме этого, происходит увеличение радиотоксичности тория за счет появления сравнительно короткоживущих изотопов тория, что может усложнить рециклирование тория.

Возможность разработки способа выгорания продуктов деления и воспроизводства в уран-

ториевых реакторах подобного размагничиванию корпусов кораблей делает перспективным создание транспортных реакторов этого типа.

Таким образом, ториевый цикл обладает следующими преимуществами [3]:

- отработавшие твэлы не нуждаются в радиохимической переработке, что значительно снижает риск загрязнения среды;
- снимается проблема накопления плутония, а, следовательно, и его распространения (в виде оружия);
- не требуется создавать новых реакторов, а достаточно модернизировать существующие под загрузку твэлы с новым топливом;
- ториевые реакторы обладают повышенной внутренней ядерной безопасностью;
- сплавы тория с небольшими добавками оружейного урана и плутония в ядерном отношении безопасны и не требуют специальных мер при хранении, они опасны только в радиационном отношении, однако это их свойство может служить дополнительной гарантией от хищения.

Недостатки ториевого цикла тоже хорошо известны:

- ториевый цикл, в целом, дороже уранового;
- исходные ториевые твэлы обладают высокой гамма-радиоактивностью, что затрудняет обращение с ними;
- жесткое гамма-излучение обуславливает необходимость дистанционного управления всеми операциями топливного цикла из операторского помещения, обеспеченного защитным экраном, что увеличивает затраты ториевого цикла по сравнению с урановым топливным циклом.

Нейтрализация продуктов распада уран-ториевого ЯТЦ посредством внешнего электромагнитного излучения

В работе [6] рассмотрена возможность создания систем электромагнитного управления мощностью реактора вблизи мгновенной критичности. Это было связано с необходимостью ликвидации последствий тяжелых аварий с разрушением конструкции реактора, например, аварий на энергоблоках Чернобыльской АЭС и Фукусима-II. Отсутствие регулирования накоплением ^{239}Pu при увеличении числа нейтронов с энергиями, близкими к резонансу ^{239}Pu , может со временем привести к повторной аварии. Это требует разработки нового подхода к управлению разрушенными реакторами, нейтрализацией энергии продуктов воспроизводства в случае,

когда их масса близка к критической, т.е. способной перевести реактор в состояние мгновенной критичности.

Внешнее электромагнитное воздействие при достаточном накоплении урана в ториевом реакторе может привести реактор в состоянии близко к мгновенной критичности. Наличие объекта, способного преобразовать энергию взрыва в искривление пространства позволяет не только использовать энергию урана, но и всех радиоактивных «обломков». Это связано с тем, что появление пространственно-временного эффекта является следствием мощного жесткого гамма-излучения, которое порождается энергией взрыва. Преобразование этой энергии увеличивает мощность излучения и создание пространственно-временного монополя.

Ядерный реактор образует с корректирующим объектом систему с обратной отрицательной связью [7].

Максимальный коэффициент усиления $K_{\max}$ реактора без обратной связи, при котором еще не происходит взрыв, соответствует скорости света, т.е. $K_{\max} = 3 \cdot 10^8$. Коэффициент обратной связи k_{OC} является коэффициентом усиления объекта и приближается к минимально возможному для ядерного реактора. Коэффициент усиления реактора, охваченного обратной связью, определяется соотношением

$$K = \frac{K_{\max}}{1 + k_{OC} K_{\max}}. \quad (1)$$

Нижняя граница значений коэффициента усиления реактора, определяющая возможность искривлений, равна

$$K_{\min} = \frac{K_{\max}}{\sqrt{2}} \equiv K_{\max} \cos \frac{\pi}{4}. \quad (2)$$

Формула для расчета коэффициента искривления пространства приведена в [5]. Ниже представлен конечный результат вывода

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{1}{k_1(1 + 10F\beta\omega_0)} \right)^2}}, \quad (3)$$

$$\omega_0 = k_{np} \cdot \frac{\alpha^3}{2\pi} \frac{c}{\ln(c^2)}, \quad (4)$$

где β – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейтронов для ^{233}U ; F – частотный коэффициент ядерного магнитного резонанса; k_1 – температурный коэффициент усиления, задающий исходное состояние реактора в момент внешнего электромагнитного воздействия; c – скорость света; α – постоянная

тонкой структуры; k_{np} – константа, необходимая для согласования размерности.

Для расчета в формуле (3) примем $k_1=1$, $F=1$, значение нулевой гармоники энерговыделения реактора $\omega_0 \approx 0,48$ Гц. В [5] показано, что значение коэффициент искривления пространства кантовано, $k=2\pi n$ ($n=1, 2, \dots, n$). Приравнивая левые части формул (1) и (2), можно рассчитать коэффициент обратной связи k_{OC}

$$k_{OC} = \left(\cos^{-1} \left(\frac{\pi}{4} \right) - 1 \right) / K_{\max} \quad (5)$$

Минимальное значение $k_{OC \min} \approx 1,4 \cdot 10^{-9}$.

Коэффициент обратной связи определяется отношением энергии фотонов на частоте терагерцового диапазона на выходе объекта к энергии γ -квантов на его входе

$$k_{OC} = \frac{h\nu_{\phi}}{h\nu_{\gamma}} = \frac{\nu_{\phi}}{\nu_{\gamma}}, \quad (6)$$

где h – постоянная Планка; ν_{ϕ} , ν_{γ} – частота фотона на выходе объекта (излучение в терагерцовом диапазоне как результат ионизации воздуха γ -квантами) и частота γ -кванта на входе (жесткое гамма-излучение) соответственно.

На основании (5, 6), при $k_{OC \min} \approx 1,4 \cdot 10^{-9}$ и $\nu_{\gamma} = 3 \cdot 10^{21}$ Гц частота терагерцового излучения составит $\nu_{\phi} = 4,2 \cdot 10^{12}$ Гц.

Частота ядерного магнитного резонанса (ЯМР) реактора является базовой для расчета исходного коэффициента усиления реактора и частоты лазера, осуществляющего воздействие на реактор. Рассчитав по (5) $k_{OC} = f_1(\omega_{MP})$, можно определить частоту внешнего электромагнитного воздействия

$$\omega_{BH} = \frac{\omega_{MP}}{k k_{OC}}.$$

При $\omega_{MP} = 3 \cdot 10^5$ Гц, $k=6,28$, $k_{OC} = 1,4 \cdot 10^{-9}$ величина частоты внешнего воздействия составит $\omega_{BH} = 3,3 \cdot 10^{13}$ Гц.

Величина ω_0 не зависит от типа реактора, что следует из (4), а значения β для ^{233}U и ^{239}Pu близки. Таким образом, ториевый реактор, вырабатывающий ^{233}U , урановый реактор с продуктом воспроизводства ^{239}Pu для создания пространственно-временного монополя одинаково приемлемы. Это позволяет производить исследование эффекта искривления пространства на более безопасном ториевом реакторе.

В обоих случаях в состоянии вблизи мгновенной критичности при наличии обратной связи с корректирующим объектом возникает пространственно-временной монополюс радиусом 6,28 км. Схема создания монополя приведена в [7].

Необходимо отметить, что помимо задачи создания корректирующего объекта и источника внешнего электромагнитного излучения необходимо разработать механизм синхронизации излучения объекта и внешнего источника. Представляется, что из-за высокой скорости протекания ядерных реакций данный механизм должен базироваться на квантовой телепортации [8].

Заключение

Проведен анализ достоинств и недостатков уран-ториевого ЯТЦ. Рассмотрена возможность создания уран-ториевых энергетических и транспортных реакторов. Предложен подход к дистанционной нейтрализации продуктов деления уран-ториевого ЯТЦ на основе эффекта искривления пространства вокруг реактора. Энергия излучения продуктов деления в состоянии реактора вблизи мгновенной критичности преобразуется в энергию деформации пространства, создающей пространственно-временной монополю реактора.

Предлагаемый подход позволяет создать технологии дистанционной нейтрализации продуктов деления уран-ториевого реактора подобно процедуре размагничивания корпуса корабля.

Ториевые и уран-ториевые реакторы в виду своей нейтронной безопасности и мощному гамма-излучению первоначально могут быть использованы в качестве исследовательских реакторов для проведения исследований эффекта искривления пространства ядерным реактором. Этот тип реакторов перспективен для разработки транспортных реакторов в связи с отсутствием запаса реактивности, что дает возможность применять в условиях боя военных кораблей и подлодок с ядерными двигателями.

Список литературы

1. <https://maximus67.livejournal.com/930924.html> Ториевый ядерный реактор.
2. <http://profbeckman.narod.ru/Th.files/L6.pdf> Бекман И.Н. Торий
3. <http://profbeckman.narod.ru> Бекман И.Н. 4. Уран-ториевый ЯТЦ
4. <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1097> Субботин С.А. Ториевый цикл. Выбираем реактор
5. Качур С.А. Управление ядерными реакторами на основе кривизны пространства. / С.А. Качур. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2016. – 220с.
6. Качур С.А. Частотный метод построения систем электромагнитного управления ядерным реак-

тором вблизи мгновенной критичности/ С.А. Качур // Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 5. – С.27-32.

7. Качур С.А. Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей //Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №1. – С. 12-19.
8. Белокуров В.В. Квантовая телепортация – обыкновенное чудо./ В.В. Белокуров, Щ.Д. Тимофеевская, О.А. Хрусталев Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 172с.

References

1. <https://maximus67.livejournal.com/930924.html> Thorium nuclear reactor .
2. <http://profbeckman.narod.ru/Th.files/L6.pdf> Bekman I.N. Thorium
3. <http://profbeckman.narod.ru> Bekman I.N. 4. Uranium-thorium NTC
4. <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1097> Subbotin S.A. Thorium cycle. We choose a reactor.
5. Kachur S.A. *Upravlenie yadernymi reaktorami na osnove krivizny prostranstva* [Control by nuclear reactors on the basis of space curvature]. Sebastopol: «RIBEST». 2016, 220p.
6. Kachur S.A. Frequency method of construction of the electromagnetic control systems by a nuclear reactor near-by instantaneous criticism. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 5, pp. 27-32.
7. Kachur S.A. Space curvature of nuclear reactor near-by prompt criticality by means of natural spatio-temporal monopole. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 1, pp. 12-19.
8. Belokurov V.V., Tmofeevskaya Sch.D., Hrustalyov O.A. *Kvantovaya teleportaciya – obyknovennoe chudo* [Quantum teleportation is an usual miracle Квантовая телепортация – обыкновенное чудо] Izhevsk: NIC «Tegulyarnaya i haoticheskaya dinamika», 2000, 172pp.

УДК 621.039.75

Оценка возможности применения различных реагентов для растворения кристаллической фазы в емкостях ХЖО на АЭС с реакторами ВВЭР-1000

Н.А. Мороз¹, Т.Н. Замыслова², С.А. Чупрынин³, Е.А. Магдыч⁴, В.В. Винниченко⁵

^{1, 2, 3}АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных станций»,
ул. Ферганская, 25, г. Москва, 109507, Россия

¹sv_nata@mail.ru, ²zamytanya@yandex.ru, ³chuprynin.sevas@mail.ru

^{4, 5}ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия

⁴ekaterinasevastopol@yandex.ru, ⁵vovchikv@mail.ua

Статья поступила 06.09.2018 г.; после доработки 10.09.2018 г.

Аннотация

Приведены результаты исследования растворимости кристаллической фазы, имитирующей отложения в емкостях ХЖО, в различных растворителях. Показано, что наиболее эффективными реагентами являются растворы щавелевой кислоты и гидроксида натрия, причем щавелевая кислота по ряду показателей оказывается более предпочтительной, так как обладает высокой эффективностью растворения кристаллической фазы при меньших затратах, что является немаловажным фактором для экономии средств и ресурсов при проведении очистки емкостей ХЖО.

Ключевые слова: радиоактивные отходы, кубовый остаток, емкости ХЖО.

Assessment of possibility of application of different chemicals used to dissolve crystalline phase storage capacities of NPP with VVER-1000

N.A. Moroz¹, T.N. Zamislova², S.A. Chuprinin³, E.A. Magdych, V.V. Vinnichenko

^{1, 2, 3}JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation»,
25 Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia,

¹sv_nata@mail.ru, ²zamytanya@yandex.ru, ³chuprynin.sevas@mail.ru

^{4, 5}Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia

⁴ekaterinasevastopol@yandex.ru, ⁵vovchikv@mail.ua

Received 06.09.2018 y.; received in final form 10.09.2018 y.

Abstract

The results of the study of crystalline phase dissolving in solvents are given. It is identified that the most effective chemicals are the oxalic acid and sodium hydroxide solution. Oxalic acid is better as it dissolves crystalline phase more effectively at lower cost which is an important factor in order to save money and resources during storage capacities cleanup.

Keywords: radioactive wastes, bottom products, storage capacities.

Введение

В течение многолетней эксплуатации атомных реакторов на АЭС в пристанционных хра-

нилищах накоплены и размещены огромные объемы жидких радиоактивных отходов в виде кубовых остатков. К настоящему времени хра-

нилища многих АЭС заполнены на 80 – 90 % [1].

Временное хранение кубовых остатков (примерно в течение двух лет) необходимо для дегазации (полного удаления ИРГ) и с целью выдержки, обеспечивающей распад короткоживущих радиоактивных изотопов. Данная операция предусматривается проектной технологией обращения с кубовыми остатками.

Однако в процессе хранения кубовых остатков, представляющих собой высококонцентрированные растворы, происходит инкрустация поверхностей баков ХЖО солями с прогрессирующим нарастанием отложений кристаллогидратов. Снижение концентрации солей в кубовом остатке путем недоупаривания при термическом концентрировании приводит к увеличению поступления жидких отходов и росту динамики заполнения ХЖО, что порождает новую проблему (объем ХЖО ограничен) и в то же время полностью не решает проблемы отложений.

Накопление отложений в емкостях ХЖО сокращает полезный объем емкостей и затрудняет обследование их состояния, а, следовательно, ведет к осложнению процесса эксплуатации.

В настоящее время для очистки емкостей ХЖО от отложений предлагаются различные установки и устройства [2-8], однако принцип действия всех установок основан на предварительном переводе отложений в жидкую форму с помощью различных растворителей и последующем ее удалении из емкости. При этом эффективность проведения очистки емкостей ХЖО во многом будет определяться выбором соответствующего реагента для растворения кристаллической фазы.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данного исследования является выбор реагента для растворения кристаллической фазы, образовавшейся в емкостях хранилищ жидких радиоактивных отходов при длительном хранении.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- приготовление модельного раствора, имитирующего кубовый остаток, и получение кристаллической фазы, имитирующей отложения в емкостях ХЖО, в лабораторных условиях;
- исследование растворимости кристаллической фазы в различных реагентах;

- исследование изменения величины pH при действии на кристаллическую фазу различных растворителей.

Методика проведения исследования

Для проведения исследования была предложена методика, включающая несколько этапов (рис.1):

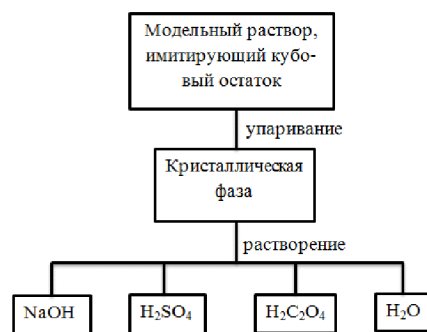


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

1. Приготовление модельного раствора, имитирующего кубовый остаток.

2. Упаривание модельного раствора до образования твердой кристаллической фазы, выдержка ее в течение определенного времени с целью получения осадка, имитирующего отложения в емкостях ХЖО.

3. Исследование растворимости полученной кристаллической фазы в различных растворителях.

В качестве растворителей были выбраны:

- растворы гидроксида натрия с концентрацией от 1 до 5 %;
- растворы серной кислоты с концентрацией от 1 до 5 %;
- растворы щавелевой кислоты с концентрацией от 1 до 5 %;
- дистиллированная вода при различных температурах.

Ограничение концентрации гидроксида натрия, серной и щавелевой кислот вызвано возможностью возникновения коррозии конструкционных материалов как емкостей ХЖО, так и элементов установки, с помощью которой планируется проводить растворение кристаллической фазы в емкостях.

4. Определение изменения величины pH при растворении кристаллической фазы в различных растворителях.

Приготовление модельного раствора, имитирующего кубовый остаток АЭС с реакторами

ВВЭР-1000 и кристаллической фазы, имитирующей отложения в емкостях ХЖО.

Согласно литературным данным [9-11], химический состав кубового остатка АЭС с реакторами ВВЭР-1000 представлен в основном натриевыми и калийными солями борной и азотной кислот, органическими веществами, комплексонами и рядом других элементов.

Для проведения исследования в качестве модельного был принят раствор, содержащий следующие ионы: BO_3^{3-} , NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ , NH_4^+ , Fe^{3+} , Co^{2+} . Кроме того, в состав модельного раствора были включены органические соединения (ЭДТА, лаурилсульфат натрия, масло техническое) в суммарном количестве 4,5 г/дм³, что соответствует среднему содержанию органических веществ в кубовых остатках АЭС с реакторами ВВЭР.

Состав модельного раствора, имитирующего кубовый остаток, приведен в таблице 1.

Таблица 1. Состав модельного раствора, имитирующего кубовый остаток АЭС с реакторами ВВЭР.

Компонент	Содержание, г/дм ³
BO_3^{3-}	150,8
NO_3^-	156,2
SO_4^{2-}	4,0
Cl^-	2,8
Na^+	140,9
K^+	37,9
NH_4^+	1,0
Fe^{3+}	4,0
Co^{2+}	0,3
Органические вещества	4,5

Приготовленный модельный раствор упаривали в течение 4 часов до образования осадка, который выдерживали 45 суток с целью получения кристаллического монолита.

Исследование растворимости кристаллической фазы, имитирующей отложения в емкостях ХЖО, в различных растворителях

Для определения растворимости кристаллической фазы навеску помещали в стакан и порциями приливали раствор соответствующего реагента или воды до полного растворения навески, при этом исследование растворимости кристаллической фазы в дистиллированной воде проводили при температуре 20, 40, 60 и 80 °С.

На основании экспериментальных данных по объему растворов, пошедших на растворение определенной массы кристаллической фазы, рассчитывали ее растворимость.

Определение величины pH проводили потенциометрическим методом с помощью иономера И-160 МИ.

Результаты определения растворимости кристаллической фазы в растворах серной, щавелевой кислот и гидроксида натрия

Результаты определения растворимости кристаллической фазы в 1-5 %-ных растворах серной, щавелевой кислот и гидроксида натрия представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты определения растворимости кристаллической фазы в 1-5 %-ных растворах серной, щавелевой кислот и гидроксида натрия, г/100 г растворителя.

Реагент	Серия эксперимента	Концентрация, С%				
		1	2	3	4	5
NaOH	1	2,75	4,90	6,06	6,85	9,49
	2	2,91	4,90	5,38	7,99	9,49
	3	2,91	4,08	5,38	7,99	9,49
	Среднее	2,86±0,09	4,63±0,44	5,61±0,36	7,61±0,61	9,49±0,00
H ₂ SO ₄	1	4,52	6,18	7,01	5,42	4,85
	2	4,52	6,178	6,14	5,42	5,38
	3	4,52	7,06	6,14	5,42	4,85
	Среднее	4,52±0,00	6,47±0,47	6,43±0,47	5,42±0,00	5,02±0,29
H ₂ C ₂ O ₄	1	3,83	4,96	9,89	12,33	16,38
	2	3,56	6,21	9,89	12,33	16,38
	3	3,56	5,52	8,25	9,86	16,38
	Среднее	3,65±0,15	5,56±0,57	9,35±0,88	11,51±1,31	16,38±0,00

На рис. 2 представлена зависимость растворимости кристаллической фазы от концентрации растворов серной, щавелевой кислот и гидроксида натрия.

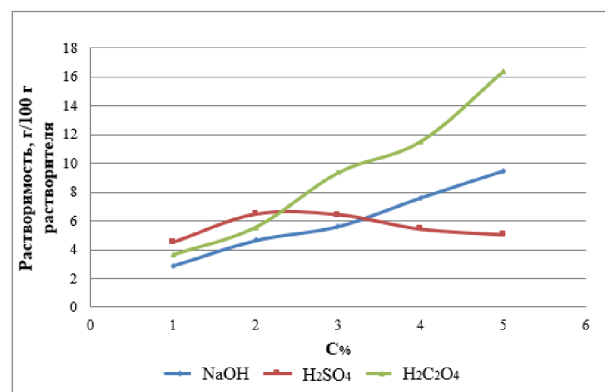


Рис. 2. Зависимость растворимости кристаллической фазы от концентрации растворов серной, щавелевой кислот и гидроксида натрия.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. В растворе серной кислоты не удалось проследить четкой зависимости растворимости кристаллической фазы от концентрации. При

низких концентрациях серной кислоты (1 – 2 %) растворимость кристаллической фазы выше, чем в растворах щавелевой кислоты и гидроксида натрия той же концентрации, однако с увеличением концентрации серной кислоты растворимость кристаллической фазы уменьшается и в 5 %-ном растворе практически равна растворимости в 1 %-ном растворе (4,52 и 5,02 г/100 г растворителя соответственно). Подобный эффект, вероятно, связан с понижением растворимости борной кислоты, образующейся при реакции основного компонента кристаллической фазы (тетрабората натрия) с серной кислотой, в сильноокислой среде вследствие смещения равновесия реакции диссоциации борной кислоты в сторону молекулярной H_3BO_3 .

2. В растворах гидроксида натрия прослеживается четкая зависимость растворимости кристаллической фазы от концентрации. При увеличении концентрации NaOH от 1 до 5 % растворимость увеличивается в 3,26 раз (с 2,91 до 9,49 г/100 г растворителя).

3. Наилучшие результаты по растворимости кристаллической фазы были получены в растворах щавелевой кислоты. Также, как и для растворов гидроксида натрия, в растворах щавелевой кислоты прослеживается четкая зависимость растворимости кристаллической фазы от концентрации. При увеличении концентрации $H_2C_2O_4$ от 1 до 5 % растворимость увеличивается в 4,49 раз (с 3,65 до 16,38 г/100 г растворителя).

Результаты определения растворимости кристаллической фазы в дистиллированной воде при различных температурах

Результаты определения растворимости кристаллической фазы в дистиллированной воде при различных температурах представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты расчета растворимости кристаллической фазы в дистиллированной воде, г/100 г растворителя.

Серия эксперимента	Температура, °С			
	20	40	60	80
1	2,78	5,60	16,95	17,15
2	2,95	5,60	16,95	17,15
3	2,78	6,3	16,95	17,15
Среднее	$2,84 \pm 0,09$	$5,83 \pm 0,37$	$16,95 \pm 0,0$	$17,15 \pm 0,0$

На рис. 3 представлена зависимость растворимости кристаллической фазы в дистиллированной воде от температуры.

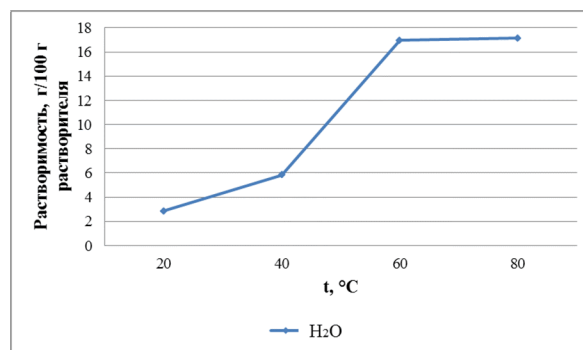


Рис. 3. Зависимость растворимости кристаллической фазы в дистиллированной воде от температуры.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. При увеличении температуры воды от 20 до 80 °С растворимость кристаллической фазы увеличивается, причем в интервале температур от 20 до 40 °С растворимость увеличивается в 2,1 раза (с 2,84 до 5,83 г/100 г растворителя), в интервале температур от 40 до 60 °С – в 2,9 раз (с 5,83 до 16,95 г/100 г растворителя), а в интервале температур от 60 до 80 °С – всего в 1,01 раза (с 16,95 до 17,15 г/100 г растворителя). Таким образом, при увеличении температуры от 20 до 60 °С наблюдается существенный рост растворимости кристаллической фазы, дальнейшее повышение температуры практически не оказывает влияния на растворимость.

2. При определении растворимости в дистиллированной воде наблюдали следующий эффект: при остывании растворов из них выделялась кристаллическая фаза. Таким образом, несмотря на хорошую растворимость кристаллической фазы в нагретой дистиллированной воде, в дальнейшем ее использование в качестве растворителя для отложений в емкостях ХЖО не приемлемо, т.к. образование кристаллической фазы при остывании полученного раствора может привести к забиванию осадками элементов системы по его откачке из емкостей.

Результаты исследования изменения величины рН при растворении кристаллической фазы в растворах серной, щавелевой кислот и гидроксида натрия

На этапе приготовления модельного раствора была определена величина рН, которая составила 11,42.

При определении растворимости кристаллической фазы в 1-5 %-ных растворах серной, щавелевой кислот и гидроксида натрия после полного растворения кристаллической фазы

определяли величину pH в полученных растворах.

Результаты определения величины pH приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения pH растворов, полученных при растворении кристаллической фазы в 1-5 %-ных растворах серной, щавелевой кислот и гидроксида натрия

C%	NaOH	H ₂ SO ₄	H ₂ C ₂ O ₄
1	12,52	8,93	9,35
2	12,62	7,64	8,31
3	12,60	1,58	7,72
4	12,57	1,26	7,02
5	12,54	1,18	6,10

На рис. 4 приведены зависимости величины pH растворов, полученных при растворении кристаллической фазы в серной, щавелевой кислотах и гидроксиде натрия от концентрации растворителей.

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. Увеличение pH в растворе, полученном при растворении кристаллической фазы в 1 %-ном растворе гидроксида натрия, по сравнению с величиной pH модельного раствора на 1,1 единицы объясняется добавлением щелочи. Дальнейшее увеличение концентрации раствора гидроксида натрия не приводит к существенному изменению величины pH.

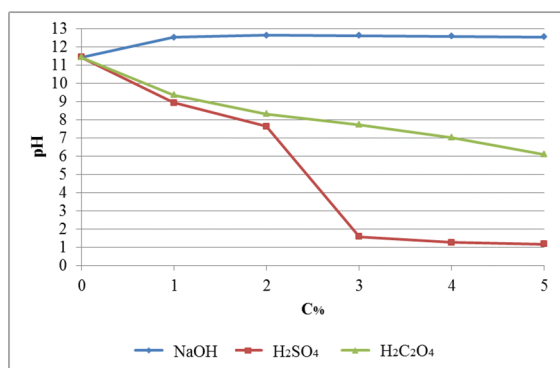


Рис. 4. Зависимость величины pH растворов, полученных при растворении кристаллической фазы в серной, щавелевой кислотах и гидроксиде натрия от концентрации растворителей.

2. В растворах серной кислоты наблюдается зависимость между величиной pH и концентрацией растворов, причем следует отметить очень резкое снижение величины pH, начиная с 2 %-ного раствора. В растворах с концентрацией 3 – 5 % величина pH меньше 2 единиц, что характерно для сильноокислой среды.

3. В растворах щавелевой кислоты также наблюдается уменьшение величины pH с уве-

личением концентрации H₂C₂O₄, однако по сравнению с растворами серной кислоты pH снижение происходит более плавно и при самой высокой концентрации pH составляет 6,1 единицы, что соответствует слабоокислой среде.

Ориентировочный расчет затрат на реагенты для растворения кристаллической фазы

Расчет проводили для гидроксида натрия и щавелевой кислоты, как наиболее эффективных реагентов для растворения кристаллической фазы. Массу кристаллической фазы для расчета принимали равной 1 тонне.

Результаты расчета затрат на реагенты для растворения одной тонны кристаллической фазы с учетом цен на 2017-2018 гг. приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты расчета затрат на реагенты для растворения одной тонны кристаллической фазы

C _{реагента} , %	Затраты на растворение 1 тонны кристаллической фазы, руб.	
	NaOH	H ₂ C ₂ O ₄
1	41667,83	51136,99
2	51477,32	67140,29
3	63727,27	59887,70
4	62638,63	64865,33
5	62787,14	56974,97

На основании полученных данных можно сделать следующие выводы:

При низких концентрациях затраты на щавелевую кислоту, необходимую для растворения одной тонны кристаллической фазы, выше, чем на гидроксид натрия, для концентраций растворов 3 – 4 % – практически равны. С ростом концентрации щавелевой кислоты затраты на этот реагент становятся меньше, чем на гидроксид натрия, и для 5 %-ных растворов составляют 56975 руб. и 62787,1 руб. соответственно.

Заключение

Щавелевая кислота и гидроксид натрия могут быть предложены как потенциальные растворители кристаллической фазы, причем щавелевая кислота по ряду показателей оказывается более предпочтительной, так как обладает более высокой эффективностью растворения кристаллической фазы, а затраты на щавелевую кислоту при применении 5 %-ного раствора меньше, чем на гидроксид натрия той же концентрации. Это немаловажные факторы для экономии средств и ресурсов при проведении очистки емкостей ХЖО.

Список литературы

1. Рябчиков Б.Е. Очистка жидких радиоактивных отходов. ДеЛи принт. М., 2008. 512 с.
2. Ампелогова Н.И., Симановский Ю.М., Трапезников А.А. Дезактивация в ядерной энергетике; Под ред. В.М. Седова. М: Энергоиздат, 1982. 256 с.
3. Пульсационный клапанный погружной насос: пат. 2249269 Рос. Федерация № 2002133760/06; заявл. 15.12.02; опубл. 27.03.05, Бюл. № 9. 17 с.
4. Устройство для очистки отстойника от радиоактивных донных отложений: пат. 2089951 Рос. Федерация № 95100380/25; заявл. 11.01.95; опубл. 10.09.97. 7 с.
5. Устройство для размыва осадка и дезактивации: пат. 2138870 Рос. Федерация № 97115463/25; заявл. 26.08.97; опубл. 27.09.99. 8 с.
6. Установка для удаления жидких радиоактивных отходов из емкостей временного хранения: пат. 2474897 Рос. Федерация № 2011133507/07; заявл. 10.08.11; опубл. 10.02.13, Бюл. № 4. 9 с.
7. Устройство очистки емкости для радиоактивных отходов: пат. 2248055 Рос. Федерация № 2002134125/06; заявл. 18.12.02; опубл. 10.03.05, Бюл. № 7. 8 с.
8. Комплекс переработки жидких радиоактивных отходов (КП ЖРО) Кольской АЭС [Электронный ресурс] // EnergyLand.info. URL: <http://www.energyland.info/analitic-show-23126>.
9. Способ переработки жидких радиоактивных отходов атомной электростанции: пат. 2226726 Рос. Федерация № 2002111276/062002111276/06; заявл. 27.04.02; опубл. 10.04.04. 6 с.
10. Способ обработки жидких радиоактивных отходов АЭС: пат. 2066493 Рос. Федерация № 95118707; заявл. 13.11.95; опубл. 10.09.96. 12 с.
11. Способ переработки жидких отходов, содержащих радионуклиды: пат. 2122753 Рос. Федерация № 97117372/25; заявл. 30.10.97; опубл. 27.11.98. 5 с.
5. *Ustrojstvo dlya razmyva osadka i dezaktivacii* [The device for erosion of sediment and decontamination]. Pat. № 2138870 Rus. Federation: appl. 26th August 1997, print 27th September 1999, 8 p.
6. *Ustanovka dlya udaleniya zhidkih radioaktivnyh othodov iz emkostej vremennogo hraneniya* [Installation for removal of liquid radioactive waste from temporary storage tanks]. Pat. № 2474897 Rus. Federation: appl. 10th August 2011, print 10th February 2013, Bull. № 4, 9 p.
7. *Ustrojstvo ochistki emkosti dlya radioaktivnyh othodov* [Radioactive waste tank cleaning device]. Pat. № 2248055 Rus. Federation: appl. 18th December 2002, print 10th March 2005, Bull. № 7, 8 p.
8. *Kompleks pererabotki zhidkih radioaktivnyh othodov (KP ZHRO) Kol'skoj AES* [Complex of processing of liquid radioactive waste (CP LRW) of Kola NPP]. Available at: <http://www.energyland.info/analitic-show-23126>.
9. *Sposob pererabotki zhidkih radioaktivnyh othodov atomnoj elektrostancii* [Method of processing liquid radioactive waste of nuclear power plant]. Pat. № 2226726 Rus. Federation: appl. 27th April 2002, print 10th April 2004, 6 p.
10. *Sposob pererabotki zhidkih radioaktivnyh othodov AES* [Method of treatment of liquid radioactive waste of NPP]. Pat. № 2066493 Rus. Federation: appl. 13th November 1995, print 10th September 1996, 12 p.
11. *Sposob pererabotki zhidkih othodov, soderzashhih radionuklidy* [Method for processing liquid waste containing radionuclides]. Pat. № 2122753 Rus. Federation: appl. 30th October 1997, print 27th December 1998, 5 p.

References

1. Ryabshikov B.E. *Ochistka zhidkih radioaktivnyh othodov* [Treatment of liquid radioactive waste]. DeLi Print, Moscow Publ., 2008, 512 p.
2. Ampelogova N.I., Simanovskiy Yu.M., Trapeznikov A.A. *Dezaktivaciya v yadernoj energetike* [Decontamination in the nuclear power industry]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982, 256 p.
3. *Pulsacionnyj klapannyj pogruzhnoi nasos* [Pulsating valve submersible pump]. Pat. № 2249269 Rus. Federation: appl. 15th December 2002, print 27th March 2005, Bull. № 9, 17 p.
4. *Ustrojstvo dlya ochistki ot radioaktivnyh donnyh otlozhenij* [Device for cleaning the sump from radioactive bottom sediments]. Pat. № 95100380/25 Rus. Federation: appl. 11th January 1995, print 10th September 1997, 7 p.

УДК 513.813

Основные соотношения дифференциальной геометрии для крышки ядерного реактора при расчетах на прочность

Пухлий В.А.¹, Коган Е.А.², Пухлий К.В.³¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

299015, Россия, г.Севастополь, ул.Курчатова, 7

²Московский политехнический университет, 107023, г.Москва, ул.Б.Семеновская, 38³АО «Аэротекс», г.Москва, ул.Мурановская, 17-147

Статья поступила 10.09.2018 г.; после доработки 14.09.2018 г.

Аннотация

Дан вывод основных соотношений дифференциальной геометрии непологой эллипсоидальной биметаллической оболочки вращения, моделирующей крышку ядерного реактора: получены выражения для коэффициентов первой и второй квадратичных форм поверхности сая, для коэффициентов Ламе, главных радиусов кривизны, подтверждена их справедливость на основе выполнения соотношений Кодаци – Гаусса.

Ключевые слова: крышка реактора, эллипсоидальные оболочки вращения, дифференциальная геометрия.

The basic parities of differential geometry for the cover of nuclear reactor at calculations durability

Pukhliy V.A.¹, Kogan E.A.², Pukhliy K.V.³¹ФГАОУ IN «Sevastopol state university»

299015, Russia, Sevastopol, street Kurchatova, 7

²Moscow polytechnical university, 107023, Moscow, street B.Semenovskaja, 38³Aeroteks Enterprise, Moscow, street Muranovsky, 17-147

Received 10.09.2018 y.; received in final form 14.09.2018 y.

Abstract

The conclusion of the basic parities of differential geometry not flat ellipsoid the bimetallic shell of rotation modeling a cover of a nuclear reactor is given: expressions for factors of the first and second square-law forms of a surface join, for factors to the Lamé, the main radiuses of curvature are received, their justice on the basis of performance of parities Kodazzi-Gauss is confirmed.

Keywords: a reactor cover, ellipsoidal rotation shells, differential geometry.

Введение

Крышка ядерного реактора, например, типа ВВЭР [1,2] является одним из основных узлов верхнего блока (рис.1) реактора. Расчет крышки реактора сводится к расчету напряженно – деформированного состояния защемленной по контуру тонкой непологой двухслойной оболочки в виде усеченного кругового эллипсоида вращения при совместном действии внутреннего

давления и температуры. Для построения уравнений термоупругости таких оболочек необходимо, прежде всего, располагать выражениями, описывающими геометрию поверхности сая. Однако эллипсоидальные непологие оболочки исследованы значительно меньше, чем оболочки вращения с постоянной кривизной меридиана (цилиндр, конус или сфера) и найти для них полную систему определяющих соотношений в литературе очень затруднительно. Достаточно

сказать, что в такой фундаментальной и ставшей настольной книгой для специалистов по теории оболочек монографии А.С. Вольмира «Устойчивость деформируемых систем» [3] объемом более 900 страниц эллипсоидальным оболочкам посвящены менее двух страниц, в основном, приведены формулы для верхнего критического давления.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью научной работы является построение основных соотношений дифференциальной геометрии для поверхности спая непологой эллипсоидальной биметаллической оболочки вращения, моделирующей крышку ядерного реактора, например, типа ВВЭР.

Ниже с использованием [4-6] получены основные соотношения дифференциальной гео-

метрии непологой эллипсоидальной биметаллической оболочки вращения: выражения для коэффициентов первой и второй квадратичных форм поверхности спая, для коэффициентов Ламе, главных радиусов кривизны, подтверждена их справедливость на основе выполнения соотношений Кодацци – Гаусса.

Для описания внутренней геометрии и построения первой квадратичной формы поверхности эллипсоида (рис.2) удобно использовать термины, а главное, координаты, принятые в геодезии, так как дифференциальная геометрия эллипсоида подробно изучена именно в сфероидической геодезии, изучающей земной эллипсоид (заметим, что в ней изучаются методы определения взаимного положения точек, расположенных на поверхности земного эллипсоида в системе геодезических координат.

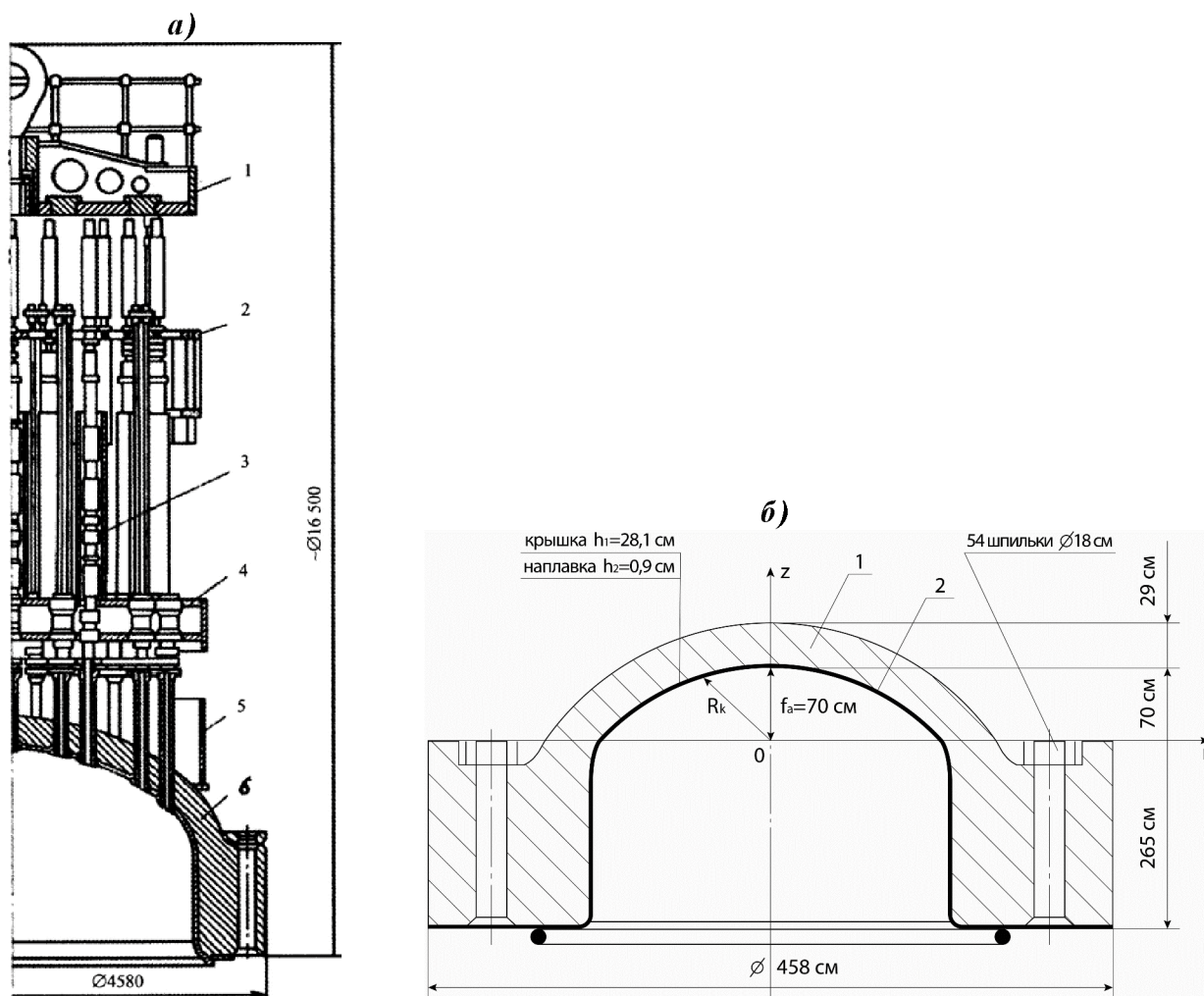


Рис. 1. К расчету крышки ядерного реактора: а) верхний блок: 1 – траверса; 2 – дистанционирующая решетка; 3 – привод шагового электромеханизма; 4 – каркас; 5 – обечайка; 6 – крышка; б) крышка реактора: 1 – материал основного металла $h_1 = 28,1$ см; 2 – антикоррозионная наплавка $h_2 = 0,9$ см.

В зарубежной литературе сфероидическую геодезию иногда называют математической или

геометрической геодезией [6]).

Относительные параметры эллипсоида

вращения, которые связаны с большой и малой полуосями и характеризуют его форму, описываются формулами:

$$a = 1 - \sqrt{1 - e^2}, \quad b = a(1 - a) = a\sqrt{1 - e^2},$$

где a – большая полуось эллипсоида, эксцентриситет $e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$.

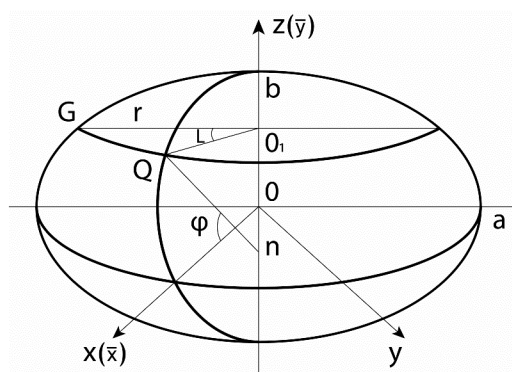


Рис. 2. К геометрии крышки-эллипсоида.

Система пространственных прямоугольных координат устанавливается следующим образом. Начало координат совпадает с центром эллипсоида O , ось Oz совпадает с вертикальной осью симметрии (осью вращения), ось Ox задается пересечением горизонтальной (экваториальной) и вертикальной (меридиональной) плоскостей, ось Oy дополняет тройку координатных векторов до правой. Для меридианов и параллелей принимаются угловые координаты: L , B – геодезические долгота и широта, Qn – нормаль к поверхности эллипсоида в точке Q .

L – геодезическая долгота – это угол между плоскостью начального меридиана и плоскостью данного меридиана, φ – геодезическая широта – острый угол между нормалью к поверхности эллипсоида и плоскостью экватора (или плоскостью любой параллели).

Меридианный эллипс, получающийся при сечении эллипсоида плоскостью, проходящей через его малую ось, показан на рис. 3. Его рассмотрение совместно с рис. 2 позволяет записать положение произвольной точки Q в различных системах координат на плоскости и установить связь между плоскими и пространственными координатами произвольной точки. Пусть:

$\bar{x}$, $\bar{y}$ – декартовы прямоугольные координаты точки Q на плоскости;

φ – угол, образованный нормалью к касательной к эллипсу в точке Q ;

χ – угол, образованный радиусом-вектором OQ с плоскостью экватора (называемый геоцентрической широтой);

u – так называемая «приведенная широта» – острый угол, образованный отрезком прямой Q_1Q_2O с плоскостью экватора, где Q_1 и Q_2 – проекции точки Q на окружности радиусов a и b , описанные вокруг точки O как центра (если использовать это понятие, то получается простая формула для вычисления радиуса произвольной параллели $r = a \cos u$).

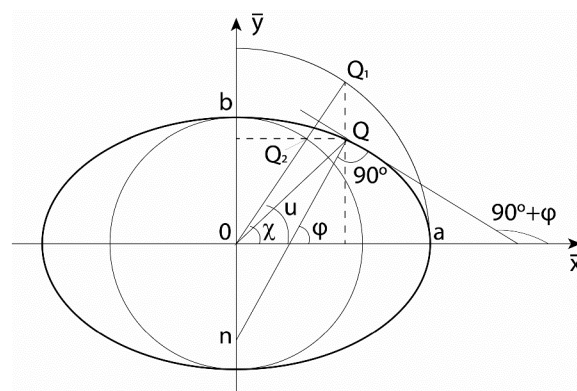


Рис. 3. Меридианный эллипс

Соотношения между введенными координатами, как следует из рис. 3, имеют вид

$$\operatorname{tg} \chi = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}, \quad (1)$$

$$\bar{x} = a \cos u, \quad \bar{y} = b \sin u$$

(здесь $a = OQ_1$, $b = OQ_2$),

$$\operatorname{tg} u = \frac{a}{b} \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}} \frac{\bar{y}}{\bar{x}}. \quad (2)$$

Сравнивая (1) и (2), устанавливаем связь «геоцентрической» и «приведенной» широт

$$\operatorname{tg} u = \frac{1}{\sqrt{1 - e^2}} \operatorname{tg} \chi. \quad (3)$$

Чтобы установить связь плоских декартовых прямоугольных координат $\bar{x}$, $\bar{y}$ с геодезической широтой φ , воспользуемся тем, что, как следует из рис. 3,

$$\operatorname{tg}(90^\circ + \varphi) = -\operatorname{ctg} \varphi = \frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} \Rightarrow$$

$$\operatorname{tg} \varphi = -1 / (d\bar{y} / d\bar{x}). \quad (4)$$

Дифференцируя далее уравнение «меридианного» эллипса $\frac{\bar{x}^2}{a^2} + \frac{\bar{y}^2}{b^2} = 1$ по $\bar{x}$, находим:

$$\left(\frac{\bar{x}^2}{a^2} + \frac{\bar{y}^2}{b^2}\right)' = \frac{2\bar{x}}{a^2} + \frac{2\bar{y}\bar{y}'}{b^2} = 0, \Rightarrow \frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} \cdot \frac{\bar{y}}{b^2} = -\frac{\bar{x}}{a^2},$$

$$\Rightarrow \frac{d\bar{y}}{d\bar{x}} = -\frac{b^2}{a^2} \frac{\bar{x}}{\bar{y}}.$$

Приравнявая полученное выражение равенству (4), получим

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{a^2}{b^2} \frac{\bar{y}}{\bar{x}} = \frac{1}{1-e^2} \frac{\bar{y}}{\bar{x}}.$$

Учитывая (2), (3), можно записать соотношения, связывающие широты произвольной точки эллипсоида Q:

$$\operatorname{tg} \chi = \sqrt{1-e^2} \operatorname{tg} u = (1-e^2) \operatorname{tg} \varphi,$$

$$\operatorname{tg} u = \sqrt{1-e^2} \operatorname{tg} \varphi.$$

Используя полученные равенства, находим далее выражения для плоских декартовых координат $\bar{x}$, $\bar{y}$ в функции широт:

$$\bar{x} = \frac{a \cos \varphi}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}}, \quad \bar{y} = \frac{a(1-e^2) \sin \varphi}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}} \quad (5)$$

$$\text{и } \bar{x} = \frac{a \sqrt{1-e^2} \cos \chi}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 \chi}},$$

$$\bar{y} = \frac{a \sqrt{1-e^2} \sin \chi}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 \chi}}. \quad (6)$$

Для определения положения произвольной точки $Q(x, y, z)$ на поверхности эллипсоида будем использовать, как это принято в геодезии, системы пространственных угловых координат: геодезические (φ), приведенные (u) и геоцентрические (χ) широты и геодезические долготы (L).

Координаты u , φ и L являются криволинейными, так как соответствующие им координатные линии – меридианы и параллели – представляют собой кривые линии.

Уравнения связи прямоугольных пространственных координат x, y, z и координат $\bar{x}, \bar{y}$ в плоскости меридионального эллипса, как следует из сопоставления рисунков 2 и 3, могут быть записаны в виде

$$x = \bar{x} \cos L, \quad y = \bar{x} \sin L, \quad z = \bar{y}.$$

С учетом (5), (6) получим уравнения связи в виде:

$$x = a \cos u \cdot \cos L, \quad y = a \cos u \cdot \sin L, \quad (7)$$

$$z = b \sin u = a \sqrt{1-e^2} \cdot \sin u$$

$$x = \frac{a \cos \varphi \cdot \cos L}{W}, \quad y = \frac{a \cos \varphi \cdot \sin L}{W}, \quad (8)$$

$$z = \frac{a(1-e^2) \sin \varphi}{W}.$$

Здесь $W = \sqrt{1-e^2 \sin^2 \varphi}$ – так называемая (в геодезии) первая основная функция широты.

Равенства (7) представляют собой параметрические уравнения поверхности эллипсоида.

С другой стороны, уравнение поверхности крышки (эллипсоида) может быть записано в векторной форме

$$\vec{r} = x\vec{i} + y\vec{j} + z\vec{k}, \quad (9)$$

где $\vec{r}$ – радиус-вектор, проведенный из центра эллипсоида к произвольной точке его поверхности, $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные орты, координаты вектора $\vec{r}$ определяются по формулам (7) или (8).

Подставляя их в (9), получим параметрическое представление уравнения поверхности эллипсоида в виде:

$$\vec{r} = a(\cos u \cdot \cos L \cdot \vec{i} + \cos u \cdot \sin L \cdot \vec{j} + \sqrt{1-e^2} \sin u \cdot \vec{k})$$

или

$$\vec{r} = \frac{a}{W} [\cos \varphi \cdot \cos L \cdot \vec{i} + \cos \varphi \cdot \sin L \cdot \vec{j} + (1-e^2) \sin \varphi \cdot \vec{k}] \quad (10)$$

Как известно, для произвольной кривой $\vec{r} = \vec{r}(t)$, где t – параметр (это уравнение, выражающее радиус-вектор произвольной точки кривой как функцию скалярного аргумента, называют векторным параметрическим представлением кривой [4]), дифференциал дуги $ds = s'(t)dt = |\vec{r}'(t)|dt$, откуда следует, что модуль дифференциала дуги равен модулю дифференциала радиуса – вектора [4]

$$|ds| = |d\vec{r}|.$$

Но полный дифференциал радиуса – вектора как функции двух независимых переменных u, L определяется выражением

$$d\vec{r} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial u} du + \frac{\partial \vec{r}}{\partial L} dL,$$

Следовательно,

$$|ds| = |d\vec{r}| = \left| \frac{\partial \vec{r}}{\partial u} du + \frac{\partial \vec{r}}{\partial L} dL \right|.$$

Поэтому, используя далее известную формулу для модуля вектора, находим выражение в параметрических координатах для первой квадратичной формы

$$ds^2 = d\vec{r}^2 = \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial u} du + \frac{\partial \vec{r}}{\partial L} dL \right)^2 = \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \right)^2 du^2 +$$

$$+ 2 \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \right) \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial L} \right) du dL + \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial L} \right)^2 dL^2 =$$

$$= E(u, L) du^2 + 2F(u, L) du dL + G(u, L) dL^2.$$

Здесь E – скалярный квадрат производной от радиуса – вектор равен

$$E = \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \right)^2 = \left(\left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \right), \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial u} \right) \right) = [(-a \sin u \cdot \cos L) \bar{i} +$$

$$+ (-a \sin u \cdot \sin L) \bar{j} + (b \cos u) \bar{k}] \cdot [(-a \sin u \cdot \cos L) \bar{i} +$$

$$+ (-a \sin u \cdot \sin L) \bar{j} + (b \cos u) \bar{k}] =$$

$$= (a \sin u \cdot \cos L)^2 (\bar{i}, \bar{i}) + (a \sin u \cdot \sin L)^2 (\bar{j}, \bar{j}) +$$

$$+ (b \cos u)^2 (\bar{k}, \bar{k}) =$$

$$= a^2 \sin^2 u \cdot \cos^2 L + a^2 \sin^2 u \cdot \sin^2 L + b^2 \cos^2 u =$$

$$= a^2 \sin^2 u + b^2 \cos^2 u = a^2 (1 - e^2 \cos^2 u),$$

так как все смешанные скалярные произведения единичных ортов

$$(i, j) = (i, k) = (j, k) = 0, \quad \text{а скалярные}$$

$$\text{квадраты} \quad \text{единичных} \quad \text{ортов}$$

$$(i, i) = (j, j) = (k, k) = 1.$$

Первая квадратичная форма определяет метрику (или, как говорят, внутреннюю геометрию) поверхности, так как, зная первую квадратичную форму, можно найти угол между любыми линиями, проходящими через произвольную точку поверхности (то есть угол между касательными к этим линиям), можно вычислить площади областей на поверхности, полную длину дуги кривой. Определение «внутренняя» подчеркивает тот факт, что имеются в виду собственные свойства поверхности, присущие именно ей и остающиеся неизменными при ее изгибаниях. Выражение для E может быть представлено также в виде

$$E = \frac{a^2 (1 - e^2)^2}{W^6}.$$

Легко показать, что для ортогональной координатной сетки (меридианов и параллелей) на поверхности эллипсоида $F(u, L) = 0$.

Действительно, так как $z_L = 0$, то

$$F = \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial u}, \frac{\partial \vec{r}}{\partial L} \right) = \frac{\partial x}{\partial u} \frac{\partial x}{\partial L} + \frac{\partial y}{\partial u} \frac{\partial y}{\partial L} + \frac{\partial z}{\partial u} \frac{\partial z}{\partial L} =$$

$$= (-a \sin u \cdot \cos L) \left(-\frac{a \cos \varphi \cdot \sin L}{W} \right) +$$

$$+ (-a \sin u \cdot \sin L) \frac{a \cos \varphi \cdot \cos L}{W} = 0. \quad (11)$$

$$G = \left(\frac{\partial \vec{r}}{\partial L} \right)^2 = \left(\frac{\partial x}{\partial L} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial L} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial L} \right)^2 =$$

$$= \frac{a^2 \cos^2 \varphi \cdot \sin^2 L}{W^2} + \frac{a^2 \cos^2 \varphi \cdot \cos^2 L}{W^2} =$$

$$= \frac{a^2 \cos^2 \varphi}{W^2}.$$

С учетом (11) линейный элемент поверхности эллипсоида будет определяться по формуле

$$ds = \sqrt{E du^2 + G dL^2} = \sqrt{M^2 du^2 + r^2 dL^2}, \quad (12)$$

где $E = A_1 = M^2$, $G = A_2 = r^2$.

Здесь A_1, A_2 – так называемые коэффициенты Ламе (они имеют смысл коэффициентов пропорциональности в формулах, выражающих дифференциалы дуг координатных линий через дифференциалы криволинейных координат: $d\alpha_1 = A_1 du$, $d\alpha_2 = A_2 dL$). При $L = \text{const}$, $dL = 0$ получаем уравнение меридиана как функции геодезической и приведенной широт

$$ds_{\text{мер}} = M du = a \sqrt{1 - e^2 \cos^2 u} du = \frac{a}{V} du,$$

$$\text{где функцию } V = \frac{1}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 u}} = \frac{W}{\sqrt{1 - e^2}}$$

называют второй основной функцией широты.

Аналогично, для параллели из условия $\varphi = \text{const}$, $d\varphi = 0$ следует

$$ds_{\text{пар}} = r dL = a \cos u \cdot dL.$$

Как известно, на любой поверхности всегда можно выбрать такие два касательных к поверхности и ортогональных между собой направления, вдоль которых радиусы кривизны будут наибольшим и наименьшим. Такие направления называются главными, а радиусы кривизны нормальных сечений, проходящих вдоль этих направлений (то есть сечений, плоскости которых содержат в себе нормаль к поверхности в данной точке), называются главными радиусами кривизны.

Кривизна произвольного нормального сечения поверхности выражается формулой Эйлера [4]

$$k_A = \frac{1}{R_A} = k_1 \cos^2 A + k_2 \sin^2 A =$$

$$= \frac{\cos^2 A}{M} + \frac{\sin^2 A}{N},$$

где A – угол, образованный касательной этого нормального сечения с первым главным направлением (азимут), k_1 и k_2 – главные кри-

визны в данной точке поверхности.

Так как $\sin^2 A$ достигает наибольшего значения 1 при $A = \pm\pi/2$, а наименьшего – 0 при $A = 0$ или $A = \pi$, то k_A принимает наибольшее и наименьшее значения при тех же значениях A .

Следовательно, при $A = 0$ или $A = \pi$ $k = k_1$, при $A = \pm\pi/2$ $k = k_2$.

Можно показать, что одно главное направление характеризуется уравнением $du = 0$, а другое главное направление – уравнением $dL = 0$.

Для эллипсоида одним из главных направлений будет направление вдоль меридиана. Кривизна этого направления будет равна величине, обратной радиусу меридиана

$$k_1 = K_{\text{мер}} = \frac{1}{M} = \frac{W^3}{a(1-e^2)}$$

или с учетом выражения для W радиус кривизны меридиана равен

$$M = \frac{a(1-e^2)}{W^3} = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}. \quad (13)$$

Вторым главным направлением на поверхности эллипсоида является направление, характеризуемое нормальным сечением, проходящим под углом $\pm\pi/2$ к меридиональному эллипсу, – это направление вдоль так называемого первого вертикала.

Поэтому по теореме Менье $r = N \cos \varphi$ [6]:

$$k_2 = K_{\text{верт}} = \frac{1}{N} = \frac{W}{a}. \quad (14)$$

Подставляя выражения для эксцентриситета

$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}$ и для $W = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$ в

(13) и (14), после элементарных преобразований получим окончательные выражения для главных радиусов кривизны эллипсоида в следующем виде:

$$M = \frac{a^2 b^2}{(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}},$$

$$N = \frac{a^2}{(a^2 \cos^2 \varphi + b^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}.$$

Как видно из полученных формул, величина главных радиусов кривизны зависит от широты.

Если в уравнениях оболочки при осесимметричном деформировании оперировать углом α – углом между нормалью к поверхности

спая и осью вращения, то $\alpha = \pi/2 - \varphi$.

Тогда при обозначении малого радиуса эллиптической крышки через c для главных радиусов кривизны эллипсоида получим окончательно формулы, совпадающие с приведенными в монографии С.П. Тимошенко и С. Войновски-Кригера [7]:

$$R_1 = \frac{a^2 c^2}{(a^2 \sin^2 \alpha + c^2 \cos^2 \alpha)^{3/2}},$$

$$R_2 = \frac{a^2}{(a^2 \sin^2 \alpha + c^2 \cos^2 \alpha)^{1/2}}.$$

Для дальнейшего удобно будет использовать соотношения, принятые в теории оболочек.

Тогда первую квадратичную форму поверхности можно задать в виде:

$$I = a_{11} du^2 + 2a_{12} du dL + a_{22} dL^2,$$

где коэффициентам первой квадратичной формы, являющимся функциями криволинейных координат, соответствуют так называемые коэффициенты Ламе:

$$a_{11} = \left(\frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u} \right)^2 = A_1^2,$$

$$a_{22} = \left(\frac{\partial x}{\partial L} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial L} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial L} \right)^2 = A_2^2.$$

Для оболочек в триортогональной системе координат $a_{12} = 0$.

Подставим в последние выражения формулы (7). Тогда

$$\begin{aligned} a_{11} &= A_1^2 = (-a \sin u \cdot \cos L)^2 + (-a \sin u \cdot \sin L)^2 + \\ &+ (b \cos u)^2 = a^2 \sin^2 u + a^2 (1 - e^2) \cos^2 u = \\ &= a^2 (1 - e^2 \cos^2 u) = a^2 \left(1 - e^2 \frac{\cos^2 \varphi}{W^2} \right) = \frac{a^2 (1 - e^2)}{W^2} \end{aligned}$$

Поэтому

$$\begin{aligned} A_1 &= \sqrt{a_{11}} = \frac{a \sqrt{1 - e^2}}{W} = \frac{a \sqrt{1 - e^2}}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}} = \\ &= \frac{a \sqrt{1 - e^2}}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}}. \end{aligned}$$

Аналогично находим

$$\begin{aligned} a_{22} &= \left(\frac{\partial x}{\partial L} \right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial L} \right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial L} \right)^2 = \\ &= (-a \cos u \sin L)^2 + (a \cos u \cos L)^2 = a^2 \cos^2 u = \\ &= \frac{a^2 \cos^2 \varphi}{W^2} = \frac{a^2 \sin^2 \alpha}{1 - e^2 \cos^2 \alpha} = A_2^2, \end{aligned}$$

Следовательно, $A_2 = \frac{a \sin \alpha}{\sqrt{1 - e^2 \cos^2 \alpha}}$.

Итак, коэффициенты Ламе для эллипсоида равны

$$A_1 = \frac{a\sqrt{1-e^2}}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 \alpha}}, A_2 = \frac{a \sin \alpha}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 \alpha}}.$$

Построение первой квадратичной формы и выражения для главных радиусов кривизны хорошо известны в литературе, так как наша планета представляет собой эллипсоид вращения. Но Земля является твердым телом и поэтому деформирование поверхности при ее искривлении в сфероидической геодезии не изучается.

Для исследования поверхности тонкой оболочки, какой является крышка реактора, необходимо знать искривленность поверхности и получить соотношения, характеризующие отклонение поверхности от касательной плоскости в окрестности точки касания.

Эти соотношения определяются так называемой второй квадратичной формой поверхности [4, 5]

$$II = b_{11}du^2 + 2b_{12}du dL + b_{22}dL^2,$$

коэффициенты которой b_{11} и b_{22} характеризуют нормальную кривизну координатных линий, а b_{12} - параметр кручения поверхности.

Согласно соотношениям дифференциальной геометрии [4] они определяются по формулам:

$$b_{11}(u, L) = (\bar{r}_{uu} \bar{n}) = \frac{(\bar{r}_{uu} \bar{r}_u \bar{r}_L)}{[\bar{r}_u \bar{r}_L]} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{EG - F^2}} \frac{\partial^2 \bar{r}}{\partial u^2} \cdot \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \bar{r}}{\partial L},$$

$$b_{12}(u, L) = (\bar{r}_{uL} \bar{n}) = \frac{(\bar{r}_{uL} \bar{r}_u \bar{r}_L)}{[\bar{r}_u \bar{r}_L]} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{EG - F^2}} \frac{\partial^2 \bar{r}}{\partial u \partial L} \cdot \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \bar{r}}{\partial L},$$

$$b_{22} = (\bar{r}_{LL} \bar{n}) = \frac{(\bar{r}_{LL} \bar{r}_u \bar{r}_L)}{[\bar{r}_u \bar{r}_L]} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{EG - F^2}} \frac{\partial^2 \bar{r}}{\partial L^2} \cdot \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \cdot \frac{\partial \bar{r}}{\partial L}.$$

Здесь $\bar{n} = \frac{\frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \bar{r}}{\partial L}}{\left| \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \bar{r}}{\partial L} \right|}$ - единичный вектор

нормали к поверхности, определяемый векторным произведением векторов $\frac{\partial \bar{r}}{\partial u}$ и $\frac{\partial \bar{r}}{\partial L}$, а

$$\left| \frac{\partial \bar{r}}{\partial u} \times \frac{\partial \bar{r}}{\partial L} \right| = \sqrt{EG - F^2} - \text{его модуль.}$$

Нижние индексы означают дифференцирование по соответствующей координате.

В общепринятых обозначениях теории оболочек $\sqrt{EG - F^2} = \sqrt{a_{11}a_{22} - a_{12}^2}$.

Для ортогональной координатной сетки

$$F = a_{12} = 0 \text{ и}$$

$$\sqrt{a_{11}a_{22}} = A_1 A_2 =$$

$$= \frac{a\sqrt{1-e^2}}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 \alpha}} \cdot \frac{a \sin \alpha}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 \alpha}} =$$

$$= \frac{a^2 \sqrt{1-e^2} \sin \alpha}{1 - e^2 \cos^2 \alpha}.$$

Если выразить $\bar{r}$ через декартовы координаты, то коэффициенты второй квадратичной формы будут вычисляться через дифференциальные определители [5]:

$$b_{11} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial u^2} & \frac{\partial^2 y}{\partial u^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial u^2} \\ \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial L} & \frac{\partial y}{\partial L} & \frac{\partial z}{\partial L} \end{vmatrix},$$

$$b_{12} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial u \partial L} & \frac{\partial^2 y}{\partial u \partial L} & \frac{\partial^2 z}{\partial u \partial L} \\ \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial L} & \frac{\partial y}{\partial L} & \frac{\partial z}{\partial L} \end{vmatrix},$$

$$b_{22} = \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 x}{\partial L^2} & \frac{\partial^2 y}{\partial L^2} & \frac{\partial^2 z}{\partial L^2} \\ \frac{\partial x}{\partial u} & \frac{\partial y}{\partial u} & \frac{\partial z}{\partial u} \\ \frac{\partial x}{\partial L} & \frac{\partial y}{\partial L} & \frac{\partial z}{\partial L} \end{vmatrix}.$$

С учетом формул (10), (12) получим

$$\begin{aligned}
b_{11} &= \frac{1}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \times \\
&\times \begin{vmatrix} -a \cos u \cdot \cos L & -a \cos u \cdot \sin L & -b \sin u \\ -a \sin u \cdot \cos L & -a \sin u \cdot \sin L & b \cos u \\ -a \cos u \cdot \sin L & -a \cos u \cdot \cos L & 0 \end{vmatrix} = \\
&= \frac{a^2 b}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \cos u = \frac{a^2 b \cos \varphi}{W \sqrt{a_{11}a_{22}}} = \\
&= \frac{a^2 b \sin \alpha}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 \alpha}} \cdot \frac{1-e^2 \cos^2 \alpha}{a^2 \sqrt{1-e^2} \sin \alpha} = \\
&= a \sqrt{1-e^2 \cos^2 \alpha}, \\
b_{12} &= 0, \\
b_{22} &= \frac{a^2 b}{\sqrt{a_{11}a_{22}}} \cos^3 u = \frac{a^2 \cdot a \sqrt{1-e^2} \cos^3 \varphi \cdot W^2}{W^3 a^2 \sqrt{1-e^2} \cos \varphi} = \\
&= \frac{a \cos^2 \varphi}{W} = \frac{a \sin^2 \alpha}{\sqrt{1-e^2 \cos^2 \alpha}}.
\end{aligned}$$

Так как $b_{12} = 0$, вторая квадратичная форма для эллипсоида вращения будет определяться выражением

$$II = b_{11} du^2 + b_{22} dL^2.$$

Первая и вторая квадратичные формы определяют собой поверхность с точностью до ее положения в пространстве. Коэффициенты обеих квадратичных форм не могут быть произвольными, они связаны определенными дифференциальными зависимостями, а именно, для всех линий на поверхности, имеющих общую касательную, кривизна нормального сечения k_0 одна и та же и выражается известной формулой [3]:

$$k_0 = \frac{II}{I} = \frac{b_{11} du^2 + 2b_{12} dudL + b_{22} dL^2}{a_{11} du^2 + 2a_{12} dudL + a_{22} dL^2}. \quad (15)$$

Если в (15) положить $du = 0$, а затем $dL = 0$, то получим соответственно

$$k_{11} = \frac{1}{R_1} = \frac{b_{11}}{a_{11}} = \frac{b_{11}}{A_1^2},$$

$$k_{22} = \frac{1}{R_2} = \frac{b_{22}}{a_{22}} = \frac{b_{22}}{A_2^2} \quad (16)$$

Подставляя найденные выше выражения для коэффициентов квадратичных форм и коэффициентов Ламе, убеждаемся в том, что соотношения (16) выполняются.

Заключение

Получена полная система основных соотношений дифференциальной геометрии неполюгой эллипсоидальной биметаллической оболочки вращения, моделирующей крышку ядерного реактора.

Список литературы

1. Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонан В.И. Конструирование ядерных реакторов: Учебное пособие для ВУЗов. Под общей ред. акад. Н.А.Доллежалы. – М.: Энергоиздат, 1982. – 400 с.
2. Лескин С.Т., Шелегова А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000: Учебное пособие. – М.: Изд-во НИЯУ «МИФИ», 2011. – 116 с.
3. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. М.: Изд-во «Наука». Глав. ред. физ.-матем. лит.-ры, 1967. – 984 с.
4. Рашевский П.К. Курс дифференциальной геометрии. Изд. 4-ое. М.: Гос. изд-во техн. – теорет. лит.-ры. – 420 с.
5. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия. М.: Изд-во «Наука». Глав. Ред. Физ.-матем. лит.-ры. 1969, – 176 с.
6. Морозов В.П. Курс сфероидической геодезии. Изд. 2, перераб. и доп. М.: Недра, 1979. – 296 с.
7. Тимошенко С.П., Войновский -Кригер С. Пластинки и оболочки М.: Физматгиз, 1963. – 636 с.

References

1. Emeljanov I.J., Mihan V. I., Solonon V. I. Designing of nuclear reactors: the Manual for HIGH SCHOOLS. Under the general editor. N.A.Dollezhalja. - M: Energoizdat, 1982. - 400 p.
2. Leskin S.T., Shelegova A.S., Slobodchuk V. I. Physical features and a design of reactor ВВЭР-1000: the Manual. - M: Publishing house MIFI, 2011,. - 116 p.
3. Volmir A.S. Stability of deformable systems. M: Publishing house "Science". 1967. - 984 p.
4. Rashevsky P.K. Kurs of differential geometry. M.: Gostechizdat, 1949. – 784 p.
5. Pogorelov A.V. Differential geometry. Publishing house "Science". M.: 1969. - 176 p.
6. Morozov V.P. Spherical geodesies. M: Bowels, 1979. - 296 p.
7. Timoshenko S.P., Vojnovsky-Kruger S. Plastinki plates and shells. M: Fizmathgiz, 1963. - 636 p.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.039.56

**Прогнозирование режимов кипения в парогенерирующем канале
на основе спектрального анализа акустических шумов****С.А. Качур***ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru*

Статья поступила 31.08.2018 г.; после доработки 03.09.2018 г.

Аннотация

Предложена модель смены режимов кипения в канале на основе акустических спектральных характеристик и описания энерговыделения функцией Бесселя. Разработан метод прогнозирования величины тепловыделения, приводящего к появлению нового, в том числе, кризисного режима.

Ключевые слова: режим кипения, реактор, спектральный анализ, функция Бесселя, акустические шумы.

**Prognostication of the Conditions of Boiling in Steam Generating
Channel on the basis of Spectral Analysis of Acoustic Noises****S.A. Kachur***Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru*

Received 31.08.2018 y.; received in final form 03.09.2018 y.

Abstract

*The model of change of the conditions of boiling in a channel on the basis of acoustic spectral descriptions and description of energy-release by the Bessel function is offered. The method of prognostication of **size** of heat-evolution resulting in appearance of new is developed, including, crisis condition.*

Keywords: boiling condition, spectral analysis, the Bessel function, acoustic noises

Введение

Одной из наиболее характерных черт энергетики в настоящее время является комплексная автоматизация технических средств. Совершенствуется элементная база автоматики, интенсивно внедряется вычислительная техника. Вместе с тем объекты автоматизации (например, энергетические установки электростанций) до сих пор совершенствуются по законам, которые только для отдельных систем учитывают влияние уровня, степени и вида автоматизации. Отсюда возможны излишняя сложность или, напротив, упрощение управляющей и контролирующей систем и слабая приспособленность

объектов к контролю (или идентификации) и управлению. [1].

Кроме того, в ядерном реакторе имеется возможность возникновения условий, при которых происходят превышения установленного уровня мощности или превышения скорости разгона.

Опасность кризиса теплообмена общеизвестна – пережог защитной оболочки вследствие резкого увеличения температуры поверхности нагрева оболочки твэла с последующим выходом продуктов деления в контур [2, 3].

Механизмы кризиса теплоотдачи в каналах в значительной мере определяются режимами

течения двухфазной смеси, недогревом жидкости до температуры насыщения и плотностью теплового потока [4].

Между всеми механизмами кризиса нет резких границ, и есть области одновременного влияния двух или более механизмов.

В связи с этим интерпретация опытных данных и форма описания их эмпирическими уравнениями вызывают определенные трудности.

Традиционным является представление опытных данных в координатах $q_{кр}(x_{кр})$ или $N_{кр}(i_{вх})$ (где $q_{кр}$ – критическая плотность теплового потока, $x_{кр}$ – критическое массовое паросодержание, $N_{кр}$ – критическая мощность, $i_{вх}$ – энтальпия на входе).

Если последняя зависимость включает первичные данные эксперимента, то при переходе к зависимости $q_{кр}(x_{кр})$ необходимо вычислить из уравнения теплового баланса $x_{кр}$, что сопряжено с дополнительными ошибками.

Важной задачей современной теории автоматического управления при кипении в активной зоне ядерного реактора является оптимальное и субоптимальное оценивание и прогнозирование параметров с использованием экспериментальных данных (характеристик). Особо важной является прогнозирование в реальном масштабе времени в эксплуатационных режимах объекта управления.

Одним из направлений при реализации алгоритмов прогнозирования является создание моделей описания процесса кипения и методов определения кризисных состояний и тенденций, приводящих к кризису теплообмена.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка модели смены режимов кипения парогенерирующего канала и метода прогнозирования тепловой нагрузки, приводящей к смене режимов, на основе спектра акустических шумов теплоносителя.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) определение информации, необходимой для построения модели смены режимов кипения в канале;
- 2) разработка модели, описывающей переход из одного режима кипения в другой;
- 3) создание метода прогнозирования удельного тепловыделения, приводящего к смене режима кипения.

Модель описания режимов кипения и метод прогнозирования смены режимов

Реализация задачи прогнозирования связана с идентификацией процессов кипения в ядерном реакторе и охватывает полный диапазон измерения структуры потока от поверхностного кипения до кризисного. На рис. 1 показан парогенерирующий канал, в котором теплоноситель (вода) по ходу своего движения и под действием теплового потока сначала нагревается до температуры насыщения, а затем претерпевает фазовые превращения [4].

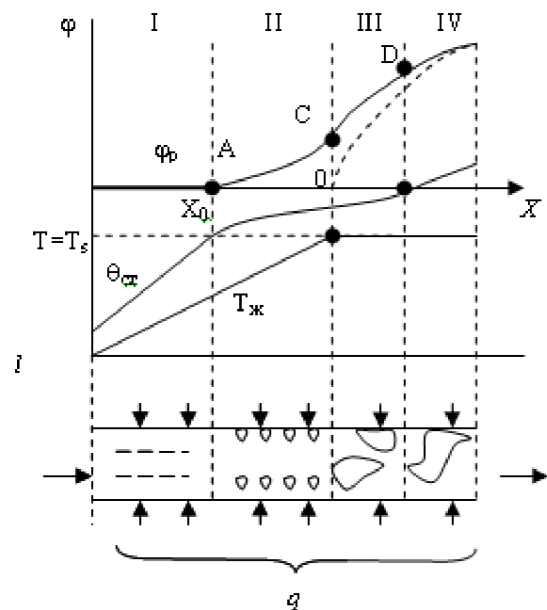


Рис. 1. Парогенерирующий канал. Параметры: $T_{ж}$ – температура жидкости; T_s – температура кипения при данном давлении; $\theta_{ст}$ – температура стенки ТВЭЛ; ϕ – истинное паросодержание; X – массовое паросодержание (относительная энтальпия); q – удельный тепловой поток; l – длина канала.

Теплоноситель, охлаждающий ТВЭЛ и нагреваемый за счет теплового потока, изменяет теплофизические характеристики в виде: температуры потока, паросодержания, вязкости и т.д. Как следует из схемы рис. 1, на ней представлены четыре режима течения теплоносителя. На начальном участке (область I) течение имеет конвективный характер, свойственный для функционирования каналов активной зоны реакторов типа ВВЭР. Область II представляет собой режим поверхностного кипения, характеризующийся следующими термодинамическими условиями: $T_{ж} < T_s$, $\theta_{ст} \geq T_s$. На этом участке паровые пузырьки образуются на поверхности нагрева, проникают в поток и конденсируются в

его ядре. Истинное объемное паросодержание (кривая АС) лежит в области отрицательных энтальпий X . Дальнейшее движение теплоносителя по его течению приводит к объемному кипению, которое имеет место при термодинамических условиях $T_{ж} = T_s$, $\theta_{ст} > T_s$ (область III). Этот режим характерен для ядерных реакторов кипящего типа на испарительном участке активной зоны. Четвертая область кипения (область IV) представляет собой кризисный участок кипения, на котором установлены термодинамические условия $T_{ж} = T_s$, $\theta_{ст} \gg T_s$. Эта область и соответствующий ей режим является недопустимым для нормальной эксплуатации ядерного реактора. В качестве исходной информации для прогнозирования режима течения теплоносителя взяты результаты эксперимента, проведенного И.А. Поповым [5], но в иной интерпретации, которая позволила построить модель смены режимов кипения. И.А. Поповым было проведено экспериментальное исследование поверхностного кипения в исследовательском канале. Исследование выполнено в кольцевом канале, вмонтированном в центральный экспериментальный канал исследовательского ядерного реактора ИР-100. Детектирование кипения в канале осуществляется акустическими гидрофонами и датчиками нейтронного потока, расположенными по высоте канала $l=0,5$ м вверху и внизу. Экспериментальные данные как результат исследований акустических измерений сводились к характеристикам, представленным на рис. 2. Частотные характеристики $S_A = F(f, q)$ отражают зависимость энергии акустического шума от подводимой удельной тепловой нагрузки q и частоты колебаний шума f .

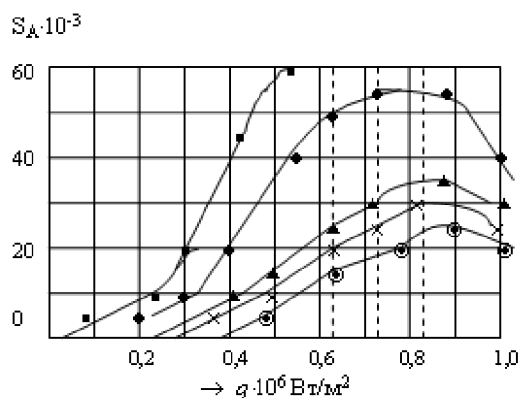


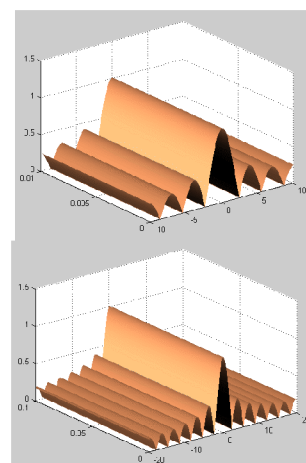
Рис. 2. Экспериментальные данные, характеризующие акустические спектральные характеристики.

Обозначения: ■ – $f=0 \dots 1$ кГц; ◆ – $f=1 \dots 2$ кГц;
▲ – $f=2 \dots 3$ кГц; × – $f=3 \dots 4$ кГц; ⊙ – $f=4 \dots 5$ кГц.

Представляется, что зависимости рис. 2. можно использовать как прототип спектрального разложения акустического шума, имеющего нулевую гармонику на частоте 1 КГц. С повышением тепловой нагрузки амплитуда шума для каждой из гармоник возрастает до определенного максимума, а после некоторый промежуток времени относительной стабильности амплитуда уменьшается.

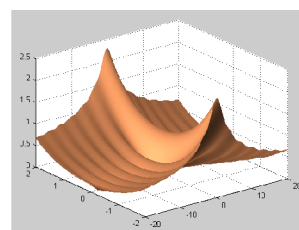
Помимо использования представленных выше экспериментальных характеристик предлагается рассмотреть влияние энергораспределения на шумовой спектр канала. Для этого воспользуемся исследованием функции Бесселя, выполненным автором в работе [6].

Полученный в результате исследования вид функций Бесселя первого рода для различных диапазонов приведен на рис. 3.

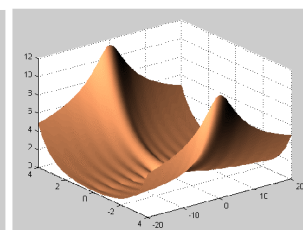


а)

б)



в)



г)

Рис. 3. Вид функции Бесселя первого рода для различных диапазонов аргументов, полученный в программной среде MATLAB.

Моделирование в программной среде MATLAB позволило вычленив нулевую и первые гармоники функции Бесселя первого рода. Для этих гармоник были определены соответственно нули функции Бесселя $\alpha_0 \div \alpha_4$ и ампли-

туды $\beta_0 \div \beta_4$. Результаты моделирования представлены в табл. 1.

Из табл. 1 видно, что для всех приведенных гармоник, кроме нулевой гармоники, которые не являются исключением среди гармоник более высокого порядка, полупериод с учетом угла (π рад) составляет $T=\pi$ [рад·с]. Для нулевой гармоники $T=3\pi/2$ [рад·с], поэтому необходимо произвести нормирование амплитуды первой гармоники относительно величины ее полупериода. В результате нормирования получим значение $\beta_0'=2\beta_0/3=0,66$.

Таблица 1. Результаты математического моделирования функции Бесселя

№ гармоники N	Амплитуда гармоники β_N	Нули функции α_N
0	1	2,38
1	0,4	5,52
2	0,3	8,64
3	0,25	11,77
4	0,22	14,91

Проведем сравнительный анализ результатов эксперимента и математического моделирования. Принимая $\beta_0=0,66$ и $\beta_1=\infty$, получим значения нормированного отношения амплитуд гармоник функции Бесселя β_N/β_{N-1} . Также выполним расчет отношений максимальных амплитуд гармоник SA_N/SA_{N-1} , приняв $SA_1=\infty$. Результаты поместим в табл. 2. Анализ табл. 2 позволяет сделать следующее заключение

$$\frac{SA_N}{SA_{N-1}} \approx \frac{\beta_N}{\beta_{N-1}} \quad (1)$$

Таблица 2. Результаты сравнения данных исследования в экспериментальном канале и математического моделирования функции Бесселя

№ гармоники спектра N	Частота гармоники спектра f_N КГц	Максимальное значение амплитуды спектра SA_N , мм	Отношение максимальных значений амплитуд SA_N/SA_{N-1}	Нормированное отношение β_N/β_{N-1}
0	1	86	0	0
1	2	52	0,6	0,6
2	3	38	0,73	0,75
3	4	31	0,82	0,83
4	5	27	0,88	0,88

Проанализируем функциональные зависимости, описывающие акустические характеристики рис. 2., используя возможности программной среды EXCEL. На рис. 4 представлены результаты полиномиальной аппроксимации

акустических характеристик. Просматривается линейная зависимость между коэффициентами при соответствующих членах различных аппроксимирующих функций. Например, суммарная характеристика пропорциональна аппроксимирующей функции для частоты 1 КГц с коэффициентом $\approx 1,7$. Именно это обстоятельство позволило интерпретировать зависимости рис. 2 как спектральное разложение с неким коэффициентом, одинаковым для всех гармоник, и поэтому не влияющим на логику рассуждений и результирующие формулы.

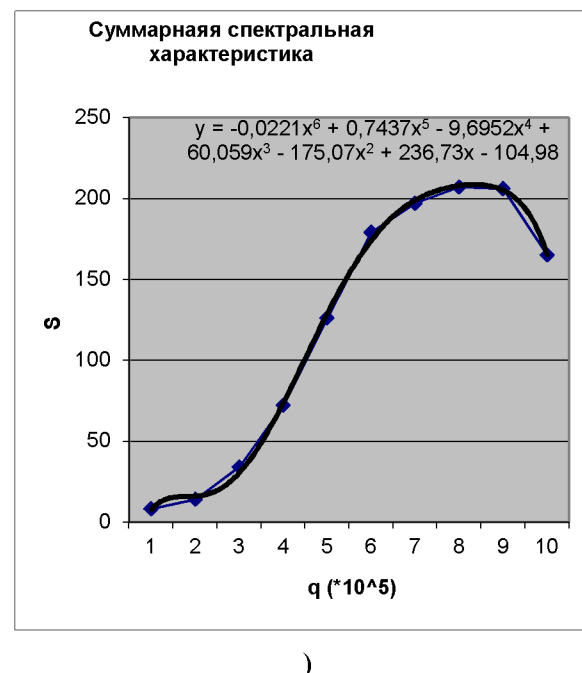
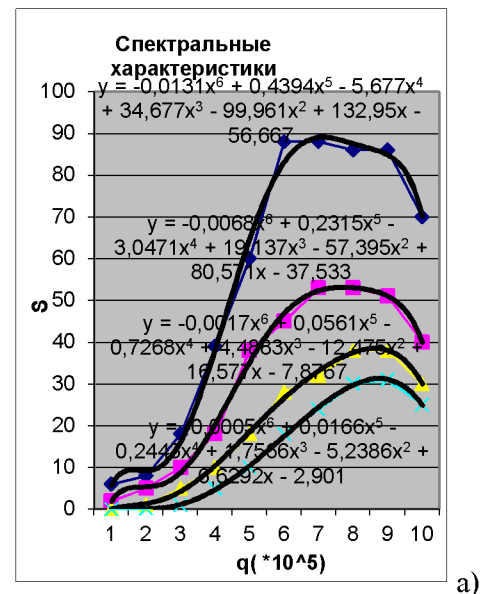


Рис. 4. Полиномиальная аппроксимация спектральных характеристик рис. 2 для частоты 1÷4 КГц (а), суммарной характеристики (б).

Данное заключение позволяет на основании функции Бесселя, эталонных функций спектра, характеризующих парогенерирующий канал, и реальных показателей акустического шума теплоносителя в виде акустической характеристики и текущего удельного теплового потока q получить весь спектр. При этом будет осуществлен прогноз значений q , соответствующих максимуму каждой из гармоник. Поскольку появление максимума очередной гармоники связано с переходом к новому режиму кипения по схеме, представленной на рис. 1, то выполняется прогноз развития процесса тепловыделения.

Применение для решения задачи прогнозирования полиномиальных функций не целесообразно. Предлагается использовать линейаризацию начальных участков спектральных характеристик до момента появления нелинейности, которая свидетельствует о достижении амплитудой своего максимума. На рис. 5 представлены линейные функции, описывающие зависимости рис. 2.

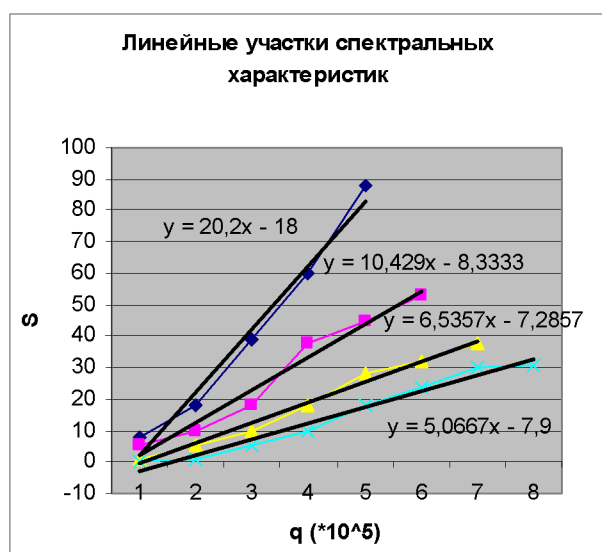


Рис. 5. Линейная аппроксимация спектральных характеристик рис. 2.

Таким образом, амплитуда N -й гармоника описывается эталонной функцией вида

$$SA_N(q) = a_N q + c_N, \quad (2)$$

где a_N и c_N – коэффициенты линейной зависимости.

Если скорость реального процесса не совпадает со скоростью процесса, описанного эталонными характеристиками, то в (2) необходимо скорректировать коэффициент a_N следующим образом

$$SA_N(q) = k_H a_N q + c_N, \quad (3)$$

$$k_H = \frac{SA_p}{q_p a_0}, \quad (4)$$

где SA_p – измеренная максимальная амплитуда нулевой гармоники; q_p – измеренная величина удельного тепловыделения; a_0 – коэффициент в выражении (2) для нулевой гармоники.

В соответствии с (1) величина максимальной амплитуды N -й гармоники определяется по формуле

$$SA_N = SA_p \prod_{i=1}^N \frac{\beta_i}{\beta_{i-1}}. \quad (5)$$

На основе полученной модели, используя (3)-(5), предлагается следующая формула для определения удельного тепловыделения, вызывающего появление максимальной амплитуды N -й гармоники

$$q_N = q_p \frac{a_0}{a_N} \left(\prod_{i=1}^N \frac{\beta_i}{\beta_{i-1}} - \frac{c_N}{SA_p} \right) \quad (6)$$

Если при измерениях шума отсутствует возможность вычлнить нулевую гармонику, то необходимо хранить еще нормирующий коэффициент, определяемый из соотношения эталонной характеристики нулевой гармоники $SA_0(q_0)$ и эталонной суммарной спектральной характеристики $SA_\Sigma(q_0)$, полученной по первым пяти аппроксимирующим функциям гармоник спектра. В этом случае аппроксимирующие функции должны иметь полиномиальный вид (рис. 4). Нормирующий коэффициент определяется при значении q_0 , которое соответствует появлению максимума в эталонной функции нулевой гармоники, и рассчитывается по формуле

$$k_{HA} = \frac{SA_0(q_0)}{SA_\Sigma(q_0)}. \quad (7)$$

Тогда нормированные значения измеренной амплитуды нулевой гармоники будет определяться соотношением

$$SA_p = SA_{\Sigma p} \frac{SA_0(q_0)}{SA_\Sigma(q_0)}, \quad (8)$$

где $SA_{\Sigma p}$ – измеренное значение акустической характеристики при появлении отрицательного ускорения в суммарной характеристике, то есть $\Delta^2 SA_{\Sigma p} < 0$.

Для (8) измеренное значение удельного теплового потока также соответствует появлению отрицательного ускорения в измеренной акустической характеристике.

Погрешность предлагаемого метода не превышает 4%, поскольку точность линейной аппроксимации спектральных характеристик составляет около 2%.

Заключение

Предложена модель смены режимов кипения в парогенерирующем канале на основе спектральных характеристик акустического шума теплоносителя и описания энерговыделения функцией Бесселя. Для созданной модели разработан метод прогнозирования величины тепловыделения, приводящего к появлению нового режима, в том числе, кризисного режима.

Полученные модель и метод предназначены для прогнозирования аномалий теплообмена в канале активной зоны как реактора типа ВВЭР, так и кипящего реактора.

Результаты исследования могут быть использованы для модификации СВРК ЯЭУ.

Список литературы

1. Еременко В.А. Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками – К.: Техника, 1988. – 256с.
2. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами/ И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов; Под общ. ред. акад. Н.А. Доллежала – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
3. Емельянов И.Я. Управление и безопасность ядерных энергетических реакторов / И.Я. Емельянов, П.А. Гаврилов, Б.Н. Селиверстов – М.: Атомиздат, 1975. – 280с.
4. Кириллов П.Л. Справочник по тепло гидравлическим расчетам. (ЯР, теплообменники, ПГ)/П.Л. Кириллов, Ю.С. Юрьев, В.П. Бобков — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 360с.
5. Попов И. А, Качур С.А. Идентификация процесса поверхностного кипения теплоносителя в активной зоне АЭУ с ВВЭР // Севастополь: Сб.науч.тр. СТУЯЭиП. – 2009. – Вып.4(32). – С.68 -76.
6. Качур С.А. Исследование управляемости ядерного реактора на основе анализа функции Бесселя/ С.А. Качур // Сб.науч.тр.СТУЯЭиП – Вып.2(46). – Севастополь: СТУЯЭиП, 2013. – С.36-45.

References

1. Eremenko V.A. *Puti obespecheniya bezopasnogo upravleniya atomnymi energeticheskimi ustanovkami* [Ways of providing of safe management by the atomic power plants]. Kiev, Techika, 1988. 256p.
2. Emel'yanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami* [Scientific and technical government bases by nuclear reactors]. Moscow, Energoizdat, 1981. 360p.
3. Emel'yanov I.Ya., Gavrilov P.A., Seliverstov B.N. *Upravlenie i bezopasnost' yadernyh energeticheskikh*

reaktorov [Control and safety of nuclear power reactors]. Moscow, Atomizdat, 1975. 280p.

4. Kirilov P.L., Yur'ev Yu.L., Bobkov V.P. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschyotam* [Reference book upon heat-hydraulic accounts]. Moscow, Energoizdat, 1990, 360p.
5. Popov I.A., Kachur S.A. Identification of process of the superficial boiling of coolant in the active zone APP with PWR. *Sevastopol: Sb.nauch.tr. SNUYaEiP*, 2009, No 4(32), pp. 68-76.
6. Kachur S.A. *Research of dirigibility of nuclear reactor on the basis of analysis of the Bessel function. Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sevastopol, SNUYaE i P, 2013, No. 2(46), pp. 36-45.

УДК 681.5:621.039

Анализ и оценка работоспособности основных элементов АСУ ТП АЭС на основе тестового диагностирования

Н.И. Кузнецова¹, В.А. Нурзай², И.С. Ямпольский³*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹nika100452@gmail.com, ²Mengsk777@yandex.ru, ³kazus2012.kazus@gmail.com*

Статья поступила 04.09.2018 г.; после доработки 04.09.2018 г.

Аннотация

*В статье раскрываются особенности проведения процедуры диагностирования, основных элементов автоматизированной системы управления технологическими процессами, в условиях реальной эксплуатации.**Ключевые слова:* программно-технический комплекс (ПТК), диагностирование, надежность.

Analysis and assessment of the operability of the main elements of automated control systems for technological processes at NPP based on test diagnostics

N.I. Kuznetsova¹, V.A. Nurzai², I.S. Yampolskiy³*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ¹nika100452@gmail.com,
²Mengsk777@yandex.ru, ³kazus2012.kazus@gmail.com*

Received 04.09.2018 y.; received in final form 04.09.2018 y.

Abstract

*The article reveals the features of the procedure for diagnosing, the main elements of the automated control system for technological processes, in conditions of real operation.**Keywords:* program - technical complex (PTC), diagnostics, reliability

Введение

На современных атомных электростанциях (АЭС) давно и широко применяются автоматические системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) на базе программно-технических комплексов (ПТК). Данные комплексы играют важную роль в обеспечении контроля и безопасности процесса производства электроэнергии. В данной работе рассмотрена проблема влияния различных родов неисправностей на функционирование программно – технических комплексов.

Постановка цели научной работы

Целью данной научной работы является исследование и анализ работоспособности ос-

новных элементов, входящих в состав данных ПТК. Это необходимо для оценки надежности и обнаружения первопричины возникновения неисправностей с их последующим, преждевременным устранением. Данную задачу можно реализовать на основе тестового диагностирования.

В качестве объекта для анализа оценки работоспособности рассмотрим программно-технический комплекс аварийных и предупредительных защит (ПТК АЗ-ПЗ).

Программно – технический комплекс АЗ-ПЗ как объект диагностирования

ПТК АЗ-ПЗ применяется в качестве технической базы при реконструкции действующих и со-

здании новых систем аварийной и предупредительной защиты на атомных электростанциях с водо-водяными энергетическими реакторами (ВВЭР-1000).

ПТК АЗ-ПЗ выполняет следующие функции:

- управляющие;
- диагностирующие;
- информационные;
- сервисные.

Основные управляющие функции ПТК АЗ-ПЗ:

- формирование сигналов аварийных защит «АЗ»;
- формирование сигналов предупредительных защит первого рода «ПЗ-1»;
- формирование сигналов предупредительных защит второго рода «ПЗ-2».

ПТК АЗ-ПЗ выполняет следующие функции диагностики:

- самодиагностирование технических и программных средств;
- контроль достоверности принимаемых / передаваемых данных;
- автоматический контроль входных и выходных цепей.

ПТК АЗ-ПЗ выполняет следующие информационные функции:

- сбор, преобразование и визуализацию значений сигналов от датчиков;
 - отображение, регистрацию и архивирование технологической, диагностической информации и действий оператора;
 - формирование и выдачу технологической сигнализации на месте установки ПТК АЗ-ПЗ на блочном щите управления (БЩУ) и резервном щите управления (РЩУ);
 - сигнализацию срабатывания управляющих сигналов аварийной и предупредительных защит и состояние первопричины срабатывания «АЗ», «ПЗ-1», «ПЗ-2»;
 - полуавтоматическое формирование отчетов.
- ПТК АЗ-ПЗ выполняет следующие сервисные функции:

- полуавтоматическую проверку технологических алгоритмов ПТК АЗ-ПЗ;
- полуавтоматическую калибровку измерительных каналов, проверку точности срабатывания уставок.

Алгоритм формирования сигналов аварийных и предупредительных защит представлен на рис. 1. Входные сигналы от трехканальных датчиков контролируемых технологических параметров поступают в три канала приема сигналов ШФС 1-3, где

преобразуются в цифровую форму в блоках ввода аналоговой информации БВА, после чего поступают для дальнейшей обработки в блоки формирования сигналов защит БФЗ.

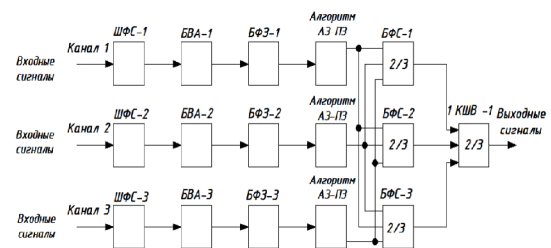


Рис. 1. Алгоритм формирования сигналов защит:

БВА – блок ввода аналоговой информации;

БФЗ – блок формирования сигналов защит;

БФС – блок формирования сигналов;

КШВ – кроссовый выходной шкаф;

ШФС – шкаф формирования сигналов.

В БФЗ все входные сигналы поступают в модуль сравнения с граничными значениями (уставками), где преобразуются в сигналы «срабатывания уставок» (пересечения параметром заданных граничных условий). Сигналы «срабатывание уставок» поступают в алгоритмический узел, в котором реализованы все алгоритмы аварийных и предупредительных защит.

Сигналы аварийных защит передаются из каждого БФЗ в БФС всех трех каналов.

Каждый БФС в каждом канале обрабатывает три сигнала одного вида защиты: от БФЗ своего канала и от БФЗ двух соседних каналов.

При получении сигналов срабатывания защиты от двух каналов (БФЗ) БФС снимают напряжение электропитания с реле размножения сигналов.

Далее сигналы блоков размножения собираются в сборки «мажоритарные 2 из 3» в КШВ и раздаются внешним потребителям.

Формирование сигнализации осуществляется в КШВ-1. Сигнализация формируется в соответствии с алгоритмами сигнализации в БФЗ. Источниками для её срабатывания являются сигналы системы и первопричины срабатывания защит, принимаемые в КШВ-1 от трех ШФС.

Сигналы сигнализации и первопричины срабатывания защит, принимаемые от БФЗ трех ШФС, обрабатываются по мажоритарной логике «2/3».

В таблице 1 приведены характерные неисправности, которые могут возникать в блоке формирования защит. То есть, данные неисправности влияют на алгоритм формирования

Система опробования состоит из программного обеспечения, аппаратного обеспечения и базы тестов.

Каждый тест представляет собой перечень значений входных и выходных сигналов, которые могут задаваться как константы, математические выражения или выражения с участием сигналов.

Подключение ПТК АЗ-ПЗ при проведении тестового диагностирования с помощью программы «Опробование» приведена на рис. 3.

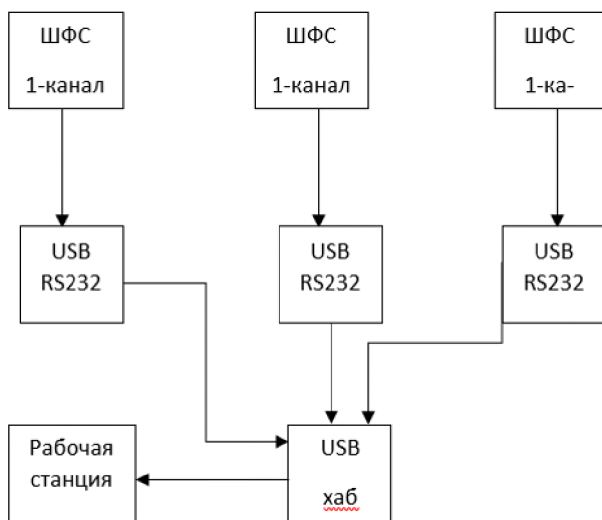


Рис. 3. Схема подключения ПТК АЗ-ПЗ при проведении тестового диагностирования с помощью программы «Опробование»

С помощью удлинителей RS232 преобразователи подключаются к разъемам, расположенным на передних панелях блоков БФЗ в каждом канале ПТК.

При опробовании значения входных сигналов, поступающих в ШФС, имитируются с помощью рабочей станции.

Во время проведения опробования выполняются выбранные тесты. Алгоритм прохождения каждого теста следующий:

- установка всех входных сигналов в исходное состояние;
- контроль установки исходного состояния;
- установка входных сигналов алгоритма (защиты) в состояние, соответствующее срабатыванию алгоритма (защиты).

Контроль представляет собой сравнение эталонного значения, указанного в базе, со значением, которое было принято от ШФС.

При несовпадении фиксируется ошибка. По окончании каждого теста выводится количество ошибок, которые возникли при прохождении теста. В конце тестирования выдается статисти-

ческая информация о тестировании.

Результат тестирования представлен на рис. 4.

Алгоритм	Результат
АЗ - Тдп < 10 с	ОК
АЗ - Тдп < 10 с	ОК
АЗ - Тдп < 10 с	ОК
АЗ - Ндп > Нзад	ОК
АЗ - Ндп > Нзад	ОК
АЗ - dTz < 10 С	ОШИБКА (16 несовпадений)
АЗ - Раз < 140 кгс/см ² и Тгн > 280 С	ОШИБКА (48 несовпадений)
АЗ - Раз < 148 кгс/см ² и Тгн > 280 С при N > 75%	ОШИБКА (64 несовпадений)
АЗ - dP ГЦН, T < 5 с	ОК
АЗ - dTнас > 75 С и Рпп < 50 кгс/см ²	ОК
АЗ - Отключение 1/2, 2/3, 3/4 ГЦН за 1.4 с	ОК
АЗ - Отключение 2/4 ГЦН при N > 75%	ОШИБКА (7 несовпадений)
АЗ - S > 6 баллов	ОК
АЗ - Лнг < Лном-650 мм, раб. ГЦН	ОК
АЗ - Гмт 3/4 ГЦН < 46 Гц	ОК
АЗ - РоБ > 0.3 кгс/см ²	ОК
АЗ - Раз > 180 кгс/см ²	ОК
АЗ - Тгн > Тном + 8 С	ОК
АЗ - Лнд < 4600 мм	ОК
АЗ - Рпп > 80 кгс/см ²	ОК
АЗ - Ндп > Нзад	ОК
АЗ - Нет 220 В на 2-х вводах СУЗ	ОК
АЗ на БЩУ	ОК
АЗ на РЩУ	ОК
ПЗ-1 - Тдп < 20 с	ОК
ПЗ-1 - Тдп < 20 с	ОШИБКА (4 несовпадений)

Рис. 4. Результат тестирования

Данный отчет является результатом диагноза, по результатам которого можно сделать вывод о работоспособности данного ПТК.

Заключение

В результате исследования работоспособности основных элементов АСУ ТП можно сделать следующие выводы:

- данная программа позволяет безошибочно произвести процесс диагностирования объекта;
- обнаружить неисправности;
- выдать результата диагноза для дальнейшего анализа неисправностей с целью их устранения.

Анализ и оценка работоспособности основных элементов АСУ ТП АЭС на основе тестового диагностирования позволяет увеличить надежность объекта и время его эксплуатации, что в свою очередь влияет на надежность АСУ ТП и энергоблока в целом.

Список литературы

1. Аникевич К.П. Программно-технический комплекс системы аварийной и предупредительной защиты ядерного реактора ВВЭР-1000 (ПТК АЗ-ПЗ) Уч. пособие Севастополь: СТУЭИП, 2010. -192 с.

2. Аникевич К.П. Программно-технический комплекс системы группового и индивидуального управления ОР СУЗ (ПТК СГИУ) Уч. пособие, Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. -392 с.
3. Инструкция по эксплуатации программно-технического комплекса системы регулирования турбины (ПТК СРТ).
4. Правила ядерной безопасности атомных станций. ПБЯ-06-90.
5. Руководство по эксплуатации программно-технический комплекс аварийной и предупредительной защиты реактора ВВЭР-1000 (ПТК АЗ-ПЗ)
6. Формуляр программно-технический комплекс аварийной и предупредительной защиты реактора ВВЭР-1000 (ПТК АЗ-ПЗ)
7. НП 306.5.0212.068-2003. Требования к порядку и содержанию работ по продлению срока эксплуатации информационных и управляющих систем, важных для безопасности атомных станций.

ehkspluatacii informacionnyh i upravlyayushchih sistem, vazhnyh dlya bezopasnosti atomnyh stancij.

References

1. Anikevich K.P. The software and hardware complex of the emergency and preventive protection system of the WWER-1000 nuclear reactor (PTC AZ-PZ). *Programmno-tekhnicheskij kompleks sistemy avarijnoj i predupreditel'noj zashchity yadernogo reaktora VVER-1000*, tutorial, Sevastopol: SNUNEI, 2010. -192 p.
2. Anikevich K.P. The software and hardware complex of the group and individual control system of the control system of the control system (PTC SGIU). *Programmno-tekhnicheskij kompleks sistemy gruppovogo i individual'nogo upravleniya*, tutorial Sevastopol: SNUNEI, 2010. -392 p.
3. Operating instructions for the software and hardware of the turbine control system (PTK SRT). *Instrukciya po ehkspluatacii programmno-tekhnicheskogo kompleksa sistemy regulirovaniya turbiny*.
4. Nuclear safety rules for nuclear power plants. *Pravila yadernoj bezopasnosti atomnyh stancij*, ABY-06-90.
5. Operation manual The software and hardware complex for emergency and preventive protection of the WWER-1000 reactor (PTC AZ-PZ) *Rukovodstvo po ehkspluatacii programmno-tekhnicheskij kompleks avarijnoj i predupreditenoj zashchity reaktora*.
6. Formulary the program and technical complex of emergency and preventive protection of the WWER-1000. *Programmno-tekhnicheskij kompleks avarijnoj i predupreditenoj zashchity reaktora* (PTC AZ-PZ)
7. NP 306.5.0212.068-2003. Requirements for the order and content of work to extend the life of information and control systems important for the safety of nuclear power plants. *Trebovaniya k porjadku i sodержaniyu rabot po prodleniyu sroka*

УДК 621.325

Разработка электронных блоков микроволнового измерителя содержания воды в нефти и нефтепродуктах

И. Б. Широков¹, И. И. Марончук²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, shirokov@ieee.org²ООО «Генезис-Таврида», ул. Щербака, 5, г. Севастополь, 299011, Россия, igimar@mail.ru

Статья поступила 03.09.2018 г.; после доработки 06.09.2018 г.

Аннотация

В статье рассматриваются исследовательские изыскания по разработке и изготовлению электроники для микроволнового измерителя влагосодержания нефти и нефтепродуктов в широком диапазоне. На основе разработанной структурной схемы определен путь создания электронных составляющих измерителя основанного на гомодинамном методе преобразования микроволновых сигналов. Обоснован выбор элементов конструкций электронного блока. Произведены разработки структурных схем, изготовлены печатные платы, корпуса и осуществлена сборка печатных узлов устройств: формирователя рабочих сигналов измерителя, микроволнового первичного преобразователя, отдельного блока микроволнового смесителя.

Ключевые слова: нефть, нефтепродукты, влагосодержание, СВЧ метод, микроволновые колебания, набег фаз, электронный блок.

Development of electronic blocks of a microwave measuring instrument for water content in oil and oil products

I. B. Shirokov¹, I. I. Maronchuk³¹FSAEE HE "Sevastopol State University," Universitetskaya St., 33, Sevastopol 299053, Russia, shirokov@ieee.org²Genesis-Tavrida Ltd., Scherbak St., 5, Sevastopol, 299011, Russia, igimar@mail.ru

Received 03.09.2018 y.; received in final form 06.09.2018 y.

Abstract

The article deals with research studies on the development and manufacture of electronics for a microwave measuring instrument for the moisture content of oil and oil products in a wide range. On the basis of the developed structural scheme, the way of creating the electronic components of the meter based on the homodynamic method of converting microwave signals is determined. The choice of structural elements of the electronic unit is justified. Structural diagrams were developed, printed circuit boards and housings were manufactured and assembly of printing units of devices was made: the driver of working signals of the meter, the microwave primary converter, a separate unit of the microwave mixer.

Keywords: oil, oil products, moisture content, microwave method, microwave oscillations, phase advance, electronic block.

Введение

В связи с бурным (непрекращающимся) развитием мировой нефтяной отрасли возникает необходимость жесткого коммерческого учёта добываемой нефти с различной степенью содержания воды (вплоть до 90%). Данный учет, в

частности, вызван необходимостью минимизации затрат при добыче, транспортировке и переработке добываемого сырья, при этом измерение влагосодержания на всех этапах технологического цикла является первостепенной, актуальной задачей.

В наших предыдущих работах детально рас-

смотрены современные методы и приборы на их основе, нашедшие применение в нефтяной отрасли России при определении водосодержания нефти и нефтепродуктов, оценены их преимущества и недостатки, представлена нормативная и методологическая база [1, 2]. Обоснована необходимость развития СВЧ методов измерения влагосодержания нефти и нефтепродуктов [3].

Проведены работы по разработке принципиально нового СВЧ метода измерения содержания воды в нефти и нефтепродуктах.

Метод функционирует в широком диапазоне, с повышенной точностью с применением микроволнового канала связи для проведения измерений набега фазы и одновременной оценкой степени поглощения микроволнового сигнала в смеси [3].

В результате проведенных исследований, кроме теоретических изысканий были начаты работы по изготовлению опытного образца проточного промышленного прибора. При этом обоснованы условия эксплуатации прибора и изготовлена конструкция опытного образца измерительной камеры с аргументированным выбором материалов и расчетом элементов конструкции, с учетом требований предъявляемых существующей отраслевой нормативной базой. Разработаны и изготовлены микроволновые антенны, встроенные в измерительную камеру [3]. Оценку прочностных характеристик спроектированной конструкции СВЧ влагомера осуществляли с помощью математического моделирования используя программный продукт SOLIDWORKS Simulation.

Исследования показали правильность разработки элементов конструкций и выбора материалов для них при эксплуатации в критических условиях [4].

Целью данной работы являлось логическое завершение изготовления прибора связанное с разработкой, обоснованным выбором элементов и изготовлением электронных блоков микроволнового измерителя в соответствии с ранее разработанной структурной схемой измерительной установки.

Постановка задачи

Из введения видно, что разработка высокоточного недорогого прибора измерения влагосодержания в нефти и нефтепродуктах в широком диапазоне эксплуатируемого при различных стадиях технологических процессов нефтяной отрасли является весьма актуальной задачей.

В настоящее время нами проводятся работы по изготовлению микроволнового измерителя

влагосодержания в нефти и нефтепродуктах. На данном этапе создания нашего прибора, необходима разработка электроники для его прецизионной, безаварийной эксплуатации. Для этих целей требуется решение задач связанных с необходимостью аргументированного выбора электронных комплектующих, а также разработка и создание электронных устройств согласно разработанной нами ранее структурной схемы прибора [3].

Целью данной работы являлось логическое завершение изготовления прибора связанное с разработкой, обоснованным выбором элементов и изготовлением электронных блоков микроволнового измерителя в соответствии с ранее разработанной структурной схемой измерительной установки.

Основной материал

Как было показано в предыдущих работах [3-5], за основу разработки микроволнового измерителя содержания воды в нефтепродуктах был взят гомодинный метод выделения информационных сигналов, который позволяет решать задачи, зачастую трудно реализуемые другими методами и средствами. Применение гомодинных методов предполагает использование исходных микроволновых колебаний в качестве сигнала гетеродина для того же самого микроволнового сигнала, но прошедшего через исследуемый объект и несущего информацию о его параметрах.

Для ухода от проблемы измерений на постоянном токе один из микроволновых сигналов сдвигают по частоте с сохранением начальной фазы исходных колебаний.

При смешивании этих микроволновых колебаний и выделении комбинационной низкочастотной составляющей разности начальная фаза исходных микроволновых колебаний исчезает, что дает возможность однозначно измерять фазовый сдвиг с высокой точностью [6, 7], вносимый исследуемым объектом и следовательно определять влагосодержание нефти и нефтепродуктов в нашем случае [5].

Упрощенная структурная схема измерительной установки, разработанная нами в предыдущей работе, позволяющей определять содержание воды в нефтепродуктах, показана на рис. 1 [3].

Разработка структурной схемы формирователя рабочих сигналов установки. Согласно представленной выше структурной схеме формирователь рабочих сигналов включает в себя

микроволновый генератор и микроволновый направленный ответвитель.

Создание подобного устройства имеет

определенную историю, развитие которой описано в теоретических исследованиях участников работы [5, 8].

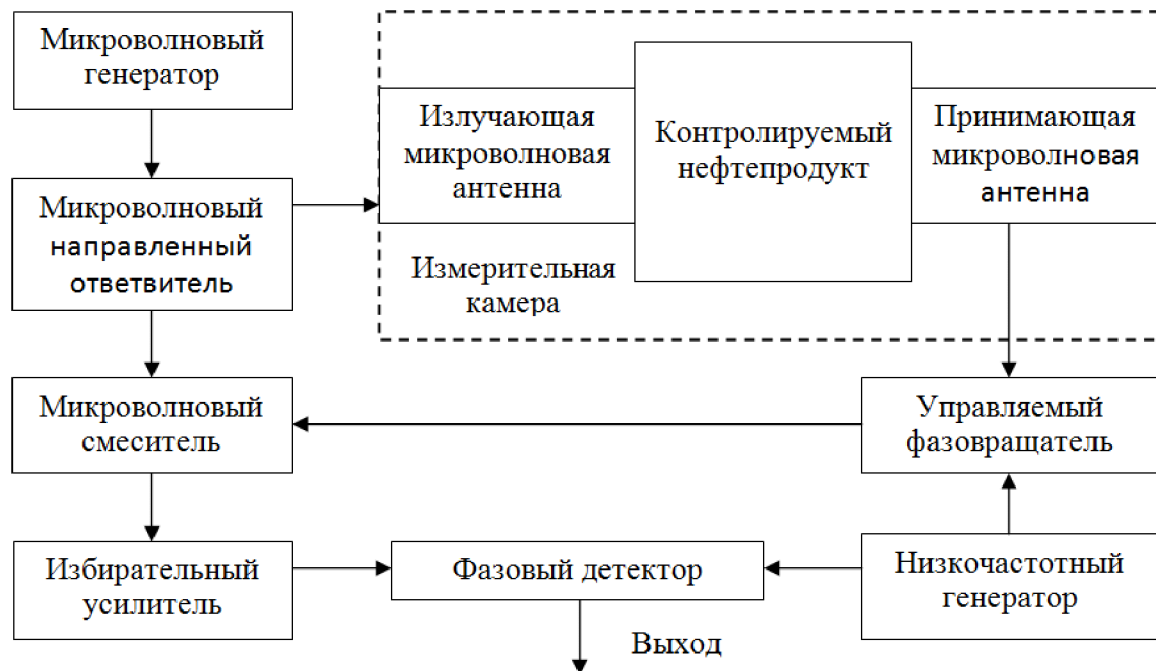


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки.

В рамках работы разработана структурная схема устройства, представленная на рис. 2, на основании которой изготовлен и сам электронный прибор и произведены его пусконаладочные работы, о чем описано ниже. Цель разработки данного устройства — определение основных параметров рабочих сигналов разрабатываемого прибора, к числу которых принадлежат: рабочая частота, сдвиг рабочей частоты, уровень мощности излучения передатчика, чувствительность приемника, спектральный состав сигналов, ширина рабочей полосы частот.

Задача устройства заключается в формировании двух высокочастотных сигналов с регулируемой амплитудой, при этом в один из сигналов может быть внесен управляемый частотный и фазовый сдвиг. При этом оба сигнала будут происходить от одного источника сигнала с известной амплитудой и частотой, что делает эти сигналы гомодинными.

Кратко, работу схемы можно описать ниже-следующим образом. Входной сигнал подается на делитель мощности, при этом его выходные сигналы синфазны и равны по мощности.

Далее полученные сигналы усиливаются посредством буферных усилителей и подаются на аттенюаторы. Аттенюаторы имеют цифровое

управление и служат для регулировки уровня выходных сигналов. Важное место занимает управляемый фазовращатель, поскольку с его помощью осуществляется частотный сдвиг одного из сигналов

В этот сигнал вносится линейный, монотонно нарастающий, фазовый сдвиг $\Delta\varphi$, при этом время, за которое величина $\Delta\varphi$ изменяется от 0° до 360° обозначено как T . Таким образом, частота входного сигнала изменяется на величину $F = 1/T$. Эта величина зависит от частоты генератора прямого цифрового синтеза, сигнал которого управляет фазовращателем.

Стабильность частотного сдвига F обеспечивается применением термостатированного опорного генератора.

Формирователи служат для получения сигналов требуемого уровня, а счетчик формирует параллельный код, необходимый для управления фазовращателем.

Режим работы всего устройства управляется микроконтроллером (МК), при этом ввод требуемых параметров осуществляет пользователь с помощью кнопок. Текущий режим работы отображается на жидкокристаллическом индикаторе (ЖКИ).

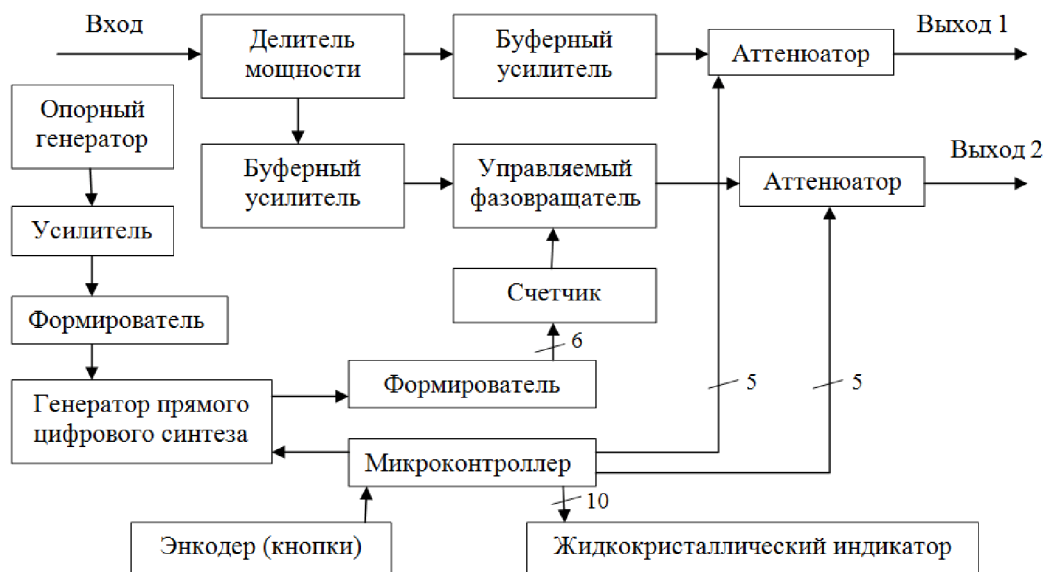


Рис. 2. Структурная схема формирователя сигналов.

Выбор и расчет делителя мощности. Делитель мощности должен формировать два синфазных выходных сигнала с равной мощностью, при этом требуется обеспечить достаточную развязку между его выходами. Указанным требованиям отвечает кольцевой делитель мощности. На наш взгляд, целесообразно выполнить такой делитель мощности на основе микрополосковых линий, для того чтобы интегрировать его в топологию печатной платы. Синтезируем топологию кольцевого делителя мощности (рисунок 3) с учетом рабочей частоты устройства, а также параметров материала печатной платы. Убедившись в том, что сопротивления всех портов согласованы и составляют 50 Ом, строим график зависимости коэффициента стоячей волны от частоты показанный на рисунке 4. Из него видно, что в области рабочей частоты системы (1,3 ГГц) согласование близко к идеальному.

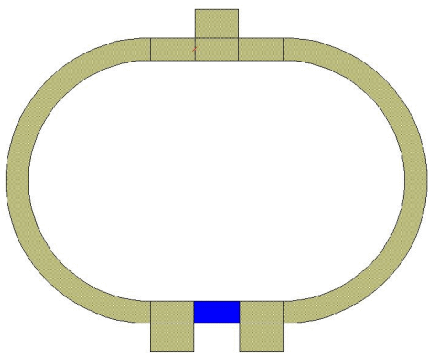


Рис. 3. Топология кольцевого делителя мощности

Чтобы оценить качество развязки строим график коэффициентов передачи между выхо-

дами делителя мощности (рисунок 5). При этом видим, что в области рабочих частот подавление составляет порядка -35 дБ, что является хорошим показателем.

Далее анализируем равномерность распределения мощности между выходами кольцевого делителя. Для этого при симуляции подавали на вход делителя сигнал мощностью 0 дБм и оценивали мощность выходных сигналов. Результаты симуляции приведены на рисунке 6. Уровень выходной мощности каждого порта составил -3 дБм, что соответствует половине входной мощности, при этом потери в самом делителе были минимальными.

Выбор управляемого фазовращателя. В последнее время широкое распространение получают интегральные дискретные фазовращатели с цифровым управлением. Примером такого фазовращателя может служить интегральная микросхема (ИМС) HMC936LP6E, реализованная на основе арсенид-галлиевой технологии, в которой управление вносимым фазовым сдвигом осуществляется путем подключения и отключения соответствующих линий задержки, по шестиразрядной цифровой шине. К особенностям ИМС можно отнести малое ослабление сигнала, высокую линейность, отсутствие необходимости в двухполярном питании, внутренне согласование с 50 Ом нагрузкой, а также компактный корпус. Наш интерес к данному продукту вызван еще и тем, что на выбранных нами рабочих частотах обеспечиваются оптимальные показатели ослабления. Таким образом, данная микросхема может быть использована для реализации схемы формирователя.

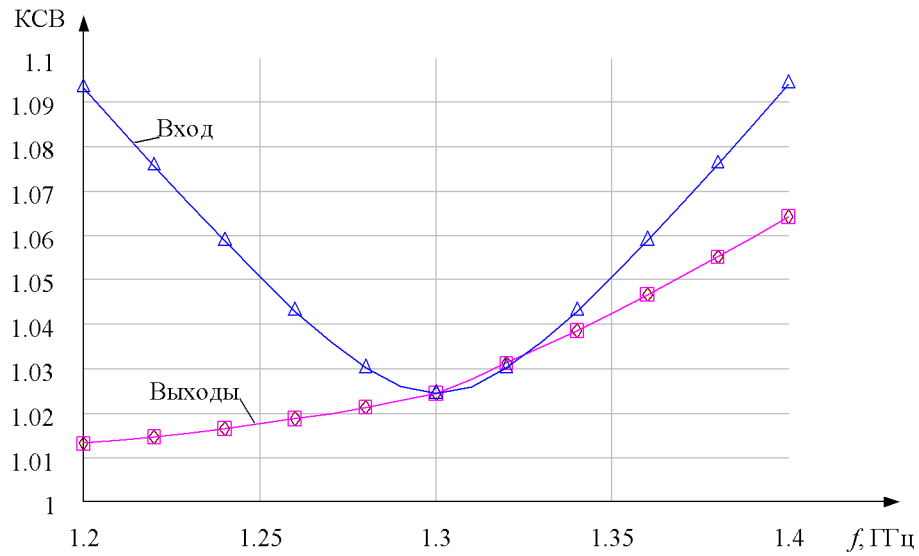


Рис. 4. Зависимость коэффициента стоячей волны от частоты

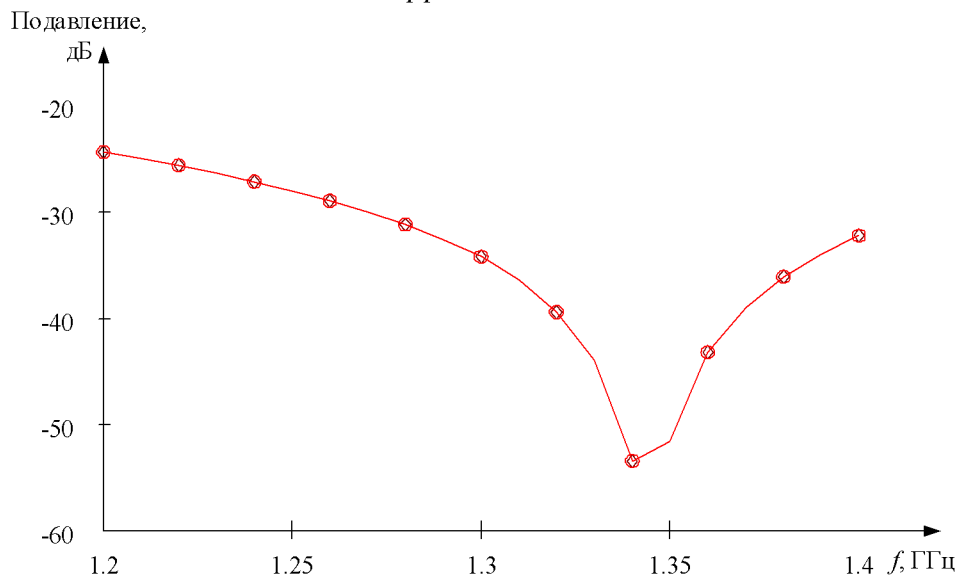


Рис. 5. Зависимость развязки между выходами от частоты

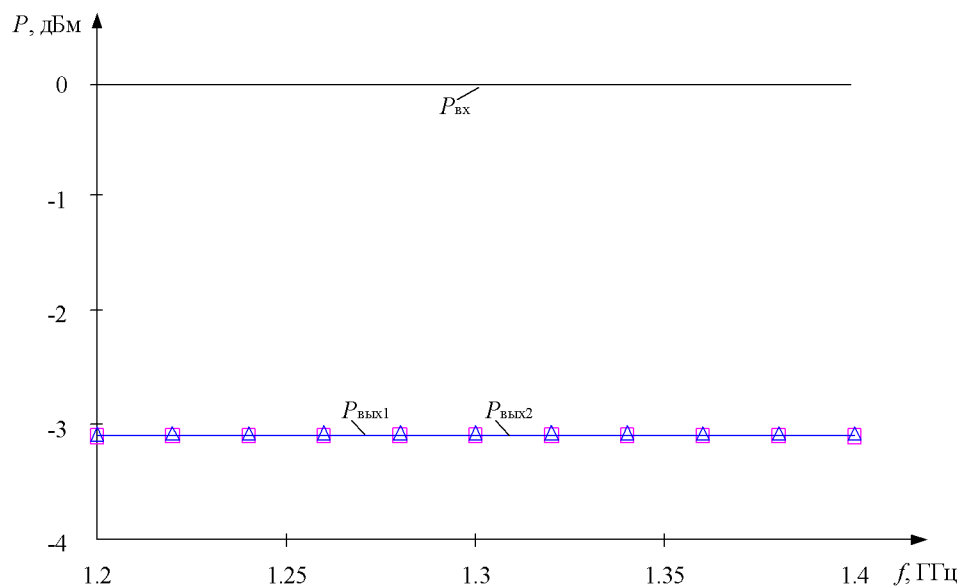


Рис. 6. Зависимость выходной мощности портов от частоты.

Разработка схемы управления фазовращателем. Управляющий сигнал для фазовращателя представляет собой параллельный шестиразрядный код. Получить его из тактирующего сигнала можно с помощью асинхронного счетчика. В качестве такого счетчика мы выбрали недорогую и доступную ИМС 74НС590.

На вход счетчика подается сигнал тактирования, частота которого будет определять величину частотного сдвига, вносимого фазовращателем. Для расширения функциональных возможностей устройства эта частота должна изменяться в широких пределах и с небольшим шагом. Этим условиям удовлетворяют генераторы на основе прямого цифрового синтеза.

В качестве ИМС синтезатора частоты выбрали AD9833, которая позволяет получить сигнал в диапазоне частот от 0 до 12,5 МГц с шагом 0,1 Гц. Управление микросхемой осуществляется посредством трехпроводного интерфейса SPI. Стабильность частоты выходного сигнала зависит от аналогичного параметра задающего генератора.

Данный параметр является очень важным, так как он влияет на точностные характеристики системы, поскольку сама система является фазовой.

В качестве задающего использовали термостатированный опорный генератор с частотой 10 МГц типа «Сонет». Размах выходного сигнала генератора составляет 1 В, при этом минимальный размах опорного сигнала синтезатора должен быть не менее 2 В. Для обеспечения требуемых параметров опорного сигнала применяли формирователь 74LVC1G14, который обеспечит размах сигнала в 5 В.

Разработка схемы регулировки уровня сигнала. Для анализа работы приемопередающего тракта системы необходимо иметь возможность менять уровень подаваемых на него сигналов в широком диапазоне. Это было реализовано посредством применения усилителей и управляемых аттенуаторов.

Выбрали маломощный усилитель SGA-0363Z в компактном корпусе SOT-363, обладающий следующими параметрами: максимальная выходная мощность: 2,3 дБм; диапазон рабочих частот: 0—5000 МГц; коэффициент усиления: 18 дБ; коэффициент шума: 3 дБ.

После того, как мощность сигнала усилена до требуемого уровня, регулировка была осуществлена с помощью аттенуатора, при этом выбрали цифровой пятиразрядный аттенуатор HMC274QS16. Управление коэффициентом пе-

редачи в котором реализуется путем включения и отключения соответствующих элементов ослабления, что позволяет получить диапазон регулировки в 31 дБ с шагом 1 дБ.

Данная ИМС характеризуется малыми вносимыми потерями (2 дБ) и работает в диапазоне частот 0,7—2,7 ГГц, что позволяет использовать ее в разрабатываемом устройстве.

Выбор управляющего микроконтроллера. Выбор МК осуществляли с учетом требуемого количества выводов для обеспечения взаимодействия со всеми вспомогательными устройствами, и наличием аппаратных интерфейсов.

Проанализировали требования к МК с учетом выбранной выше компонентной базы.

Для управления каждым аттенуатором HMC274QS16 нужно предусмотреть по 5 линий ввода-вывода. Конфигурация синтезатора частоты осуществляется посредством трехпроводного интерфейса SPI.

Кроме того, устройство следует оснастить средством отображения информации. Выбрали символьный ЖКИ AC204A с контроллером HD44780. Для его подключения к МК требуется задействовать еще 10 линий ввода-вывода.

Для взаимодействия с оператором предусмотрели средства ввода в виде тактовых кнопок и энкодера, для подключения которых необходимо 5 линий ввода-вывода, при этом одна из них поддерживает внешние прерывания.

Таким образом, МК должен иметь как минимум 28 линий ввода-вывода. Указанным требованиям удовлетворяет восьмиразрядный МК PIC16F877 фирмы Microchip в 40-выводном корпусе DIP40.

Разработка печатной платы формирователя. В результате использования выбранной компонентной базы разработана принципиальная схема, которая позволяет в полной мере реализовать требуемый функционал формирователя сигналов. В соответствии со схемой, разработана топология и изготовлена печатная плата, фотография которой показана на рисунке 7.

Печатная плата разведена в двух слоях и имеет размер 160х120 мм. ЖКИ и устройства ввода соединяются с основной платой посредством гибких шлейфов. Подключение СВЧ сигналов осуществляется посредством торцевых разъемов типа SMA. В центре платы установлен субмодуль с микросхемой фазовращателя HMC936LP6E.

В настоящее время идет разработка и отладка программного обеспечения формирователя сигналов.

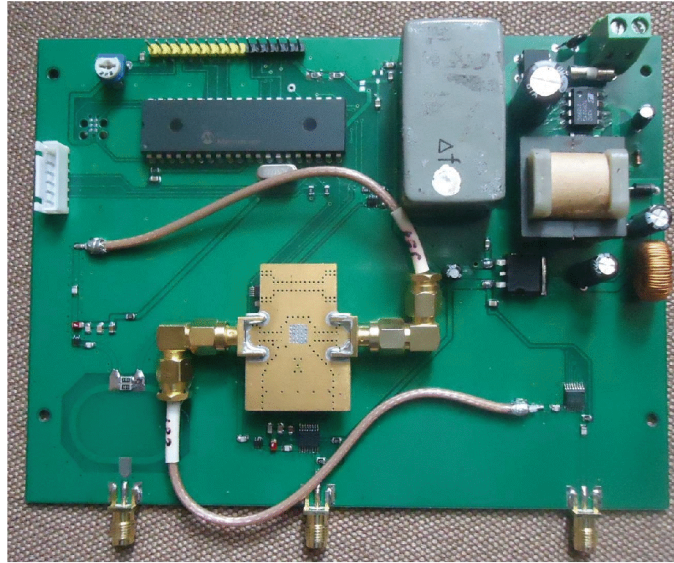


Рис. 7. Фотография печатной платы формирователя в сборе.

Разработка модуля преобразования микроволновых сигналов. Для определения оптимального режима работы микроволнового смесителя, который является неотъемлемой частью измерительной установки, нами принято решение изготовить его отдельным модулем, подключаемым к устройству формирования сигналов. С помощью этого модуля в процессе экспериментальных исследований можно определять требуемый уровень сигнала гетеродина при заданном диапазоне изменений уровня полезного сигнала, снимаемого с выхода приемной антенны измерительной камеры. Представляется, что при изменении содержания воды в нефтепродуктах в

широких пределах уровень сигнала на входе смесителя также будет изменяться в широких пределах.

Также можно определять диапазон изменения уровня выходного сигнала, его спектральный состав. Совместно с помощью блока формирования рабочих сигналов и микроволнового смесителя можно исследовать работу системы при различных частотных сдвигах микроволновых сигналов. По изготовлению устройства будет снята частотная характеристика микроволнового смесителя по изменению рабочих частот микроволнового диапазона. Принципиальная схема смесителя показана на рисунке 8.

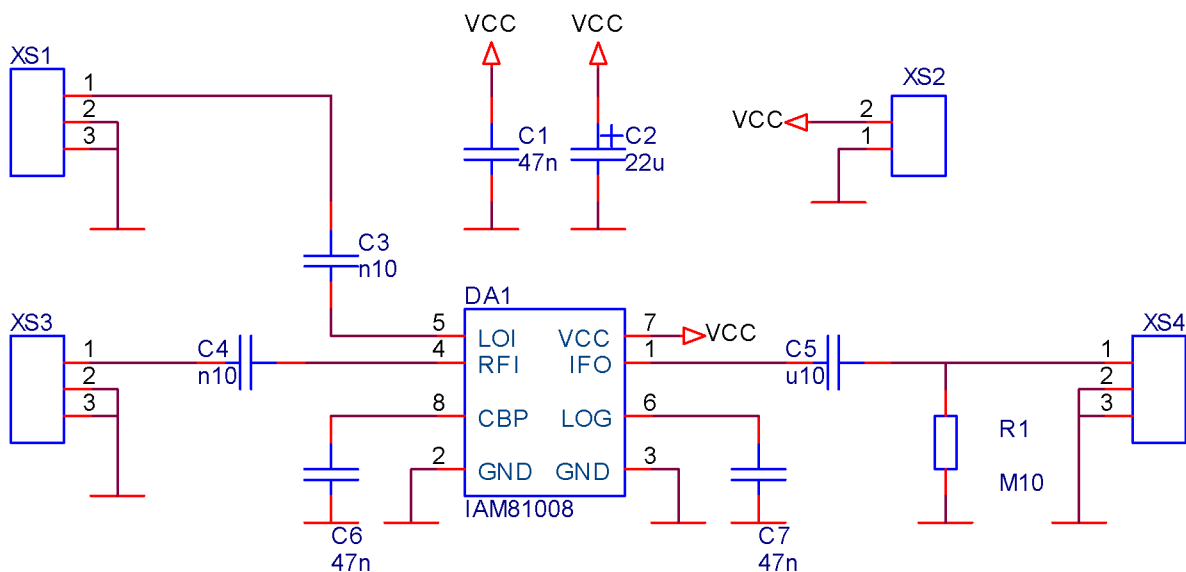


Рис. 8. Принципиальная схема смесителя.

На рис. 9 показан внешний вид изготовленного микроволнового смесителя и его подключение к блоку формирования рабочих сигналов, изготовленного ранее.

Всестороннее исследование работы микроволнового смесителя на различных режимах позволит установить требуемую выходную мощность микроволнового сигнала на выходе усилителя мощности микроволнового блока первичного преобразователя (см. ниже).



Рис. 9. Внешний вид микроволнового смесителя, подключенного к блоку формирования рабочих сигналов (со снятой крышкой).

Разработка микроволнового блока первичного преобразователя. На основе описанной выше структурной схемы была разработана принципиальная электрическая схема микроволнового блока первичного преобразования, являющегося главным узлом измерителя содержания воды в нефтепродуктах. Именно первичный преобразователь производит все необходимые преобразования микроволновых и низкочастотных сигналов, обеспечивает извлечение полезной информации о содержании воды в нефтепродуктах, заключенной в набеge фазы микроволнового сигнала.

Разработана принципиальная электрическая схема микроволнового первичного преобразователя, на основе которой разработана и изготовлена печатная плата и собран сам микроволновый первичный преобразователь, фотография которого показана на рисунке 10.

При разработке блока первичного преобразования закладывалась некоторая избыточность

Представляется, что уровень мощности устанавливается адаптивно по результатам замера степени ослабления микроволнового сигнала. Данная опция заложена в конструкцию первичного преобразователя.

Окончательное решение будет принято по результатам экспериментальных исследований, которые будут осуществлены на следующем этапе нашей работы.

конструкции, и вводились некоторые опции, которые в окончательной версии микроволнового первичного преобразователя, возможно, не будут использованы. Надо понимать, что на данном этапе велось планирование и подготовка экспериментальных исследований, поэтому возможные опции закладывались по максимуму. По этой же причине микроволновый смеситель был изготовлен в виде отдельного блока. По результатам экспериментальных исследований номиналы некоторых элементов, будут изменены, возможно, будет изменена и принципиальная схема устройства.

Разработанная схема электрическая принципиальная блока первичного преобразователя достаточно сложна и алгоритм ее работы тоже имеет определенные особенности. Реализуется указанный алгоритм работы с помощью встроенных в конструкцию первичного преобразователя двух микроконтроллеров фирмы Microchip.

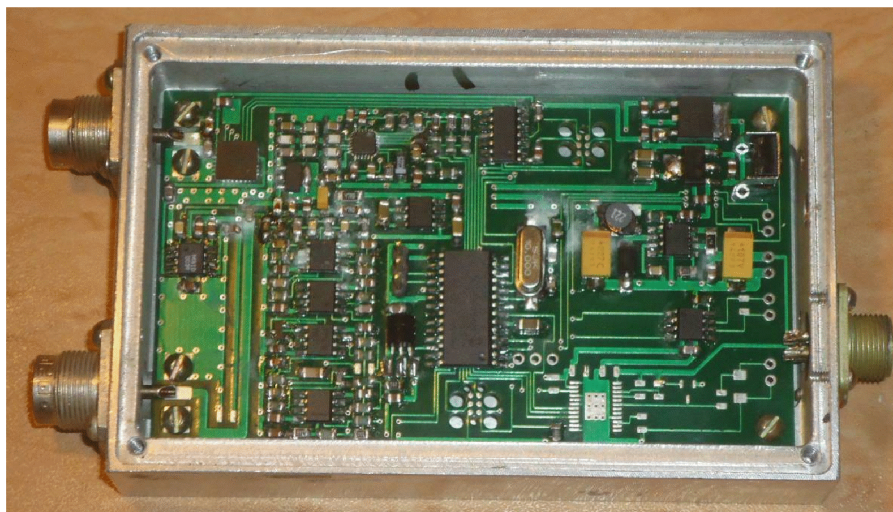


Рис. 10. Внешний вид микроволнового первичного преобразователя.

Заключение

Таким образом, в результате проведенных исследований, на основе разработанной структурной схемы определен путь создания электронных составляющих измерителя содержания воды в нефти и нефтепродуктах, основанного на гомодинном методе преобразования микроволновых сигналов, с помощью которого можно получать полезную информацию на базе фазовых измерений электрических сигналов. При высоких показателях точности измерений, известной простоте и повторяемости конструкции.

Произведена разработка и изготовление печатной платы электронного блока экспериментального образца микроволнового измерителя влагосодержания в нефти и нефтепродуктах, а именно разработана структурная схема и изготовлена печатная плата формирователя рабочих сигналов измерителя. Осуществлена сборка печатной платы формирователя.

При этом, обоснован выбор элементов конструкций электронного блока: осуществлен выбор и расчет делителя мощности, выбор управляемого фазовращателя с разработкой схемы управления фазовращателем, разработана схема регулировки уровня сигнала, выбран управляющий микроконтроллер.

Разработана схема и изготовлена печатная плата микроволнового первичного преобразователя, разработана конструкция и изготовлен корпус микроволнового первичного преобразователя, разработана и изготовлена конструкция отдельного блока микроволнового смесителя. Осуществлена сборка печатных узлов прибора.

Было принято решение не давать детальное описание конструкции первичного преобразо-

вателя и подробное описание алгоритма его работы в рамках настоящей статьи. Во-первых, это ограничивается объемом материала, во-вторых, сам алгоритм работы и, возможно, сама конструкция первичного преобразователя будут изменены и окончательно сформированы только после экспериментальных исследований и найдут отражение в нашей следующей публикации.

В дальнейшей работе планируется провести финишную сборку разработанного микроволнового измерителя влагосодержания нефти и нефтепродуктов с созданием испытательного стенда для экспериментальных исследований его характеристик. По результатам экспериментальных исследований, при необходимости, будет осуществлена модернизация разработанного прибора, как со стороны измерительной камеры, так и его электронных устройств.

Источники финансирования и выражение признательности

Работа выполнена в рамках выполнения проекта по договору № 2200ГС1/37052 при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере Российской Федерации.

Список литературы

1. Широков И.Б. Методы определения водосодержания в нефти и нефтепродуктах, остаточного содержания нефтепродуктов в воде / И.И. Марончук, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии. — 2017. — Т. 3. — № 4. — С. 130-145.
2. Марончук И.И. Приборы, применяемые для определения содержания воды в нефти и

- нефтепродуктах (обзор) / И.И. Марончук, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии. — 2018. — Т. 4. — № 1. — С. 56-73.
3. Широков И.Б. Разработка СВЧ - метода высокоточного измерения процентного содержания воды в водонефтяной смеси / И.И. Марончук, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии. — 2018. — Т.4. — № 2. — С.115-120.
4. Черкашина Н.И. Разработка элементов конструкций измерителя влаги в нефти и нефтепродуктах на основе СВЧ метода / И.И. Марончук, Н.И. Черкашина, И.Б. Широков // Энергетические установки и технологии. — 2018. — Т.4. — № 2. — С.121-130.
5. Пат. 2594338 Российская Федерация МПК G01N 22/00 (2013.01), G01F 13/00 Способ определения процентного содержания воды в смеси диэлектрик-вода при изменении содержания воды в смеси в широких пределах / Широков И. Б. Патентообладатель: Широков И. Б. №2016114471/93; заявл. 13.04.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. №22. — 8 с.
6. Радиотехнические системы: Учебник для вузов / Под ред. Ю.М. Казаринова. — М.: Высш. школа, 1990. — 496 с
7. Пестряков, В.Б. Фазовые радиотехнические системы. Основы статистической теории — М.: Советское радио, 1968. — 468 с.
8. Пат. 2594344 Российская Федерация МПК G01N 22/00 (2006.01), E21F 17/00 (2006.01), A62B 15/00 Способ контроля изменений интегрального состава вещества / Широков И. Б. Патентообладатель: Широков И. Б. №2016114872/93; заявл. 18.04.2016; опубл. 10.08.2016, Бюл. №22. — 8 с.
5. Pat. 2594338 Russian Federation IPC G01N 22/00 (2013.01), G01F 13/00 A method for determining the percentage of water in a mixture of dielectric—trick—water when the water content in the mixture varies over a wide range / Shirokov I.B. The patent holder: Shirokov I. B. № 2016114471/93; claimed. 13/04/2016; publ. August 10, 2016, Bul. №22.— 8p.
6. 6. Radio engineering systems: Textbook for high schools / Ed. Yu.M. Kazarinov. — M.: Higher education. School, 1990. — 496 p.
7. Pestryakov V.B. Phase radio engineering systems. Fundamentals of the statistical theory — Moscow: Sovetskoye radio, 1968. — 468 p.
8. Pat. 2594344 Russian Federation IPC G01N 22/00 (2006.01), E21F 17/00 (2006.01), A62B 15/00 A method for controlling changes in the integral composition of a substance / Shirokov I.B. Patent—holder: Shirokov I.B., No. 2206114872/93; claimed. 04/18/2016; publ. August 10, 2016, Bul. №22.—8p.

References

1. Shirokov I.B. Methods for determination of water content in oil and oil products, residual oil content in water / I.I. Marunchuk, I.B. Shirokov // Energy Installations and Technologies. — 2017. — Т. 3. — No. 4. — P. 130—145.
2. Maronchuk I.I. Instruments used to determine the water content in oil and petroleum products (review) / I.I. Maronchuk, I.B. Shirokov // Energy Installations and Technologies. — 2018. — Т. 4. — No. 1. — P. 56—73.
3. Shirokov I.B. Development of the microwave method of high—precision measurement of the percentage of water in the water—oil mixture / I.I. Maronchuk, I.B. Shirokov // Energy Installations and Technologies. — 2018. — Т.4. — No. 2. — P.115—120.
4. Cherkashina N.I. Development of the elements of moisture meter design in oil and oil products based on the microwave method / I.I. Maronchuk, N.I. Cherkashin, I.B. Shirokov // Energy Installations and Technologies — 2018. — Т.4. — No. 2. — P.121—130.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.91: 620.92: 621.383.51

Некоторые результаты исследования солнечных установок для обеспечения автономных потребителей в удалённых районахВ.В. Кувшинов¹, И.А. Антонович², Д.А. Раханский³, С.З. Вейсова⁴*ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹VVKuvshinov@sevsu.ru, ²Antonovich@sevsu.ru, ³Rahankiy95@mail.ru,
⁴VSWeysova@sevsu.ru*

Статья поступила 31.08.2018 г.; после доработки 05.09.2018 г.

Аннотация

Приведены результаты экспериментальных данных для фотоэлектрического модуля, используемого для солнечных электроустановок, с целью изучения режимов работы фотоэлектрических систем в различных широтах, при различных климатических условиях. Для электроснабжения потребителей в труднодоступных районах Российской Федерации более эффективно использование фотоэлектрических установок малой мощности, с различными оптимальными углами установки, наиболее приемлемыми для данной местности.

Ключевые слова: фотопреобразователь, поликремневый фотоэлектрический модуль, фотоэлектрические станции, солнечный элемент, угол установки модуля, мощностные характеристики.

Some results of the study of solar installations for providing autonomous consumers in remote areasV.V. Kuvshinov¹, I.A. Antonovich², D.A. Rakhansky³, S.Z. Weisova⁴*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²VVSmirnov@sevsu.ru@mail.ru, ³Dmitriychunin@gmail.com, ⁴Reshetnyk@mail.ru*

Received 31.08.2018 y.; received in final form 05.09.2018 y.

Abstract

The results of experimental data for the photoelectric module used for solar electrical installations are presented with the purpose of studying the operation modes of photovoltaic systems in various latitudes under different climatic conditions. To power consumers in hard-to-reach areas of the Russian Federation, it is more effective to use low-power photovoltaic systems, with different optimal installation angles that are most suitable for the area.

Keywords: photo converter, polysilicon photoelectric module, photovoltaic stations, solar cell, module installation angle, power characteristics.

Введение

Многие районы современной России не имеют возможностей для установки собствен-

ных генерирующих мощностей. В частности, это районы крайнего севера, районы Сибири, горные районы, а также многие районы юга России, особенно в тех местах, где находятся

обширные засушливые пустынные Земли. Также некоторые районы Российской Федерации не имеют возможностей использовать собственные генерирующие установки по причине экономической нецелесообразности, т.е. строительство линий электропередач для этих мест просто невыгодно. При этом в таких районах также проживают немногочисленные жители, они оказываются лишенные электроснабжения, причем в связи с непостоянным сезонным количеством населения, потребление электрической энергии в различные сезоны года непостоянно. Строительство крупных электрогенерирующих мощностей на этих территориях неэффективно. Для таких районов наиболее целесообразно использовать малые электростанции, однако, в связи с большой удаленностью районов от транспортных путей и неблагоприятным климатом, подвоз топлива в некоторые сезоны года может быть затруднительным. Альтернативой электростанциям на традиционном топливе являются энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В частности, из всех установок на основе ВИЭ, авторами статьи предлагается использовать солнечные фотоэлектрические установки [1]. Предлагаемые авторами установки имеют небольшую мощность, не требуют топлива, легко транспортируются, могут быть установлены в течение короткого времени и практически на любой местности. Однако при работе таких установок могут возникать определённые проблемы, связанные с приходом солнечной радиации на рабочую поверхность фотоэлектрических модулей [2]. В предложенной авторами статье приводятся некоторые результаты исследований, проведенные на солнечных установках, с целью выявления возможных недостатков, приводящих к потерям мощности и уменьшению эффективности работы.

Постановка задачи исследования

Главной проблемой при использовании фотоэлектрических установок в некоторых районах Российской Федерации является невысокая плотность и непостоянство потока солнечной радиации, преобразовываемой в электрическую энергию, как следствие низкая эффективность использования фотопреобразователей. Невысокий радиационный потенциал солнечной энергии определяет более высокие требования к эффективности использования солнечных установок для электроснабжения индивидуальных потребителей, к методам определения их основ-

ных параметров, к способам увеличения их мощностных характеристик [3].

Повысить мощность фотоэлектрических станций, не увеличивая их площади, можно при использовании оптимального угла наклона рабочей поверхности их модулей к нормали вектора потока солнечного излучения. Однако для этого необходимо постоянно в течение какого-то времени менять угол наклона плоскости приемной поверхности фотоэлектрической установки. Для этого можно использовать трековые системы или слежения, или механическим путем изменять плоскость установки. Эти методы энергозатратны и трудновыполнимы, а также требуют использования дополнительных конструкций, что приводит к удорожанию всей системы. Авторами статьи предложены альтернативные решения, которые можно использовать для установки фотоэлектрических модулей в различных широтах, а также учитывать климатические условия местности [4].

Представленные эксперименты проводились на кафедре «Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети» Севастопольского государственного университета (Института Ядерной энергии и промышленности). Стратегической целью исследований являлось изучение изменения вольтамперных и мощностных характеристик фотоэлектрических солнечных установок в зависимости от их работы при различных климатических факторах в различных областях Российской Федерации [5]. В данной работе в качестве основного объекта исследования был выбран серийный заводской фотоэлектрический поликремневый модуль PS-250. Из аналогичных элементов состоят модули российского производства [4], используемые на крымских сетевых электрических станциях (рис. 1).



Рис. 1. Внешний вид поликремневого фотоэлектрического модуля PS-250.

Модуль состоит из поликремневых элементов с характеристиками, сходными с характеристиками других типовых модулей, используемых на сетевых фотоэлектрических станциях. Мощность модуля составляет 250 Вт, КПД солнечных элементов составляет 17 %. Его вольтамперные характеристики также близки к другим промышленным модулям.

При проведении исследований использовался метод прямых измерений тока и напряжения при заданных нагрузочных характеристиках [6].

Задачей исследования авторов являлось экспериментальным путём получить показатели фотоэлектрических преобразователей, в частности их мощностные характеристики. Для достижения поставленной цели были проведены натурные исследования сетевого модуля в условиях максимальной освещённости (близкой к 1000 Вт/м^2), а также в условиях облачности, низкой атмосферной температуры, при наличии снежного покрова и при изменяемом угле установки рабочей поверхности модуля.

По результатам экспериментальных исследований можно с большой уверенностью делать практические рекомендации для использования фотоэлектрических установок в местностях с низкими атмосферными температурами, большим количеством пасмурных и облачных дней, постоянным наличием снежного покрова [7]. А эксперименты при изменяемом угле установки модуля можно использовать для имитации работы фотоэлектрической станции в различных широтах России [8].

Результаты исследования

Исследования проводились на открытой территории в ясные солнечные дни при постоянной освещённости [6]. Главной целью данного исследования было получение зависимостей изменения выходной мощности фотоэлектрического модуля в разные месяцы года, при разной атмосферной температуре, различной облачности, наличии снежного покрова и при различном угле установки модуля. На графиках (рис. 2) приведены усредненные вольтамперные и мощностные характеристики модуля PS 250, полученные при испытаниях в 2017-2018 г.г. в различные месяцы года.

Заводские значения тока и напряжения, соответствующие значению номинальной мощности модуля, составляют 30,6 В и 8,21 А, при стандартных условиях (освещённость: 1000 Вт/м^2 , температура рабочей поверхности: 25°C , АМ: 1,5) [6].

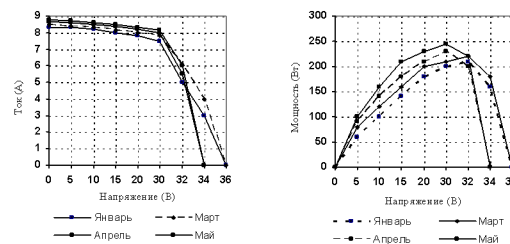


Рис. 2. Вольтамперные и мощностные усредненные характеристики модуля.

Однако при натурных испытаниях значение напряжения в рабочей точке с уменьшением температуры увеличивается до 36 В, при этом мощностные характеристики сохраняются. При проведении экспериментов в различные времена года, но при одинаковой освещённости были получены экспериментальные значения вольтамперных характеристик модуля при различных температурных показателях. На графиках (рис. 3) видно, что при одинаковых значениях освещённости модуля его мощность была наибольшей при низких температурах. При этом увеличивались значения напряжений, и смещалась рабочая точка на графике вольтамперной характеристики [6]. Коэффициент преобразования модуля, в зависимости от освещённости, улучшался в холодную ясную погоду, особенно эффективно работал модуль зимой при $T = 0^\circ\text{C}$, и снижался в весенние месяцы при повышении температуры рабочей поверхности.

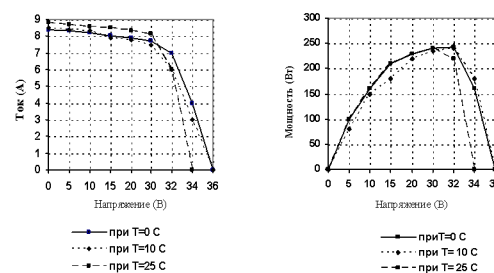


Рис. 3. Зависимости вольтамперной и мощностной характеристик модуля (полученные в разное время года при одинаковой освещённости (около 900 Вт/м^2) и различной атмосферной температуре).

Как видно из результатов, наилучший режим работы модуля наблюдался при низких температурах. Холодная температура воздуха положительно сказывается на работе модуля [2], причем хорошо видно увеличение коэффициента преобразования модуля, в отличие от плюсовых температур. Эти данные показывают, что при понижении температур ниже стандартных условий (25°C) увеличение КПД полупроводни-

ковых фотопреобразователей может достигать 0,5% на 1°C.

В условиях облачности (освещенность менее 200 Вт/м²) зависимость мощностных характеристик модуля от угла наклона меняется по другим характеристикам (рис. 4). При отклонении плоскости модуля от перпендикулярного направления на точку, в которой находится Солнце, фототок и вырабатываемая мощность начинают расти, и достигают своего максимума при горизонтальном расположении модуля (рис. 4). Это происходит в момент, когда солнечный диск полностью закрыт облаками и модуль преобразовывает только рассеянное излучение, приходящее со всех сторон небосвода [5].

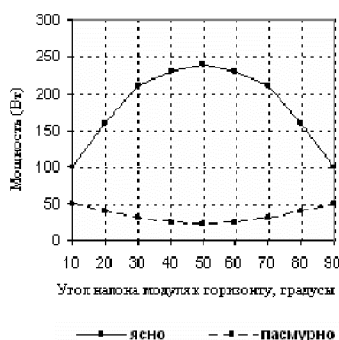


Рис. 4. Изменение мощности модуля в зависимости от угла наклона (при различной облачности).

При высокой облачности угол установки модуля к горизонту составляет 0°, при ясной погоде, наоборот, угол установки плоскости модуля соответствовал направлению на Солнце, то есть равнялся углу солнечного склонения. При этом при равной освещенности коэффициент преобразования модуля был выше в ясную погоду, чем при высокой облачности, то есть на работу модуля влияет спектр солнечного излучения, который различен в пасмурную и ясную погоду [2]. Представляет интерес зависимость при работе модуля при наличии снежного покрова (рис. 5).

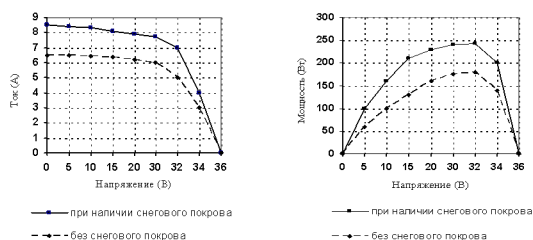


Рис. 5. Вольтамперные и мощностные характеристики, полученные при наличии снежного покрова (мощность падающего солнечного излучения 700 Вт/м²).

Значительное увеличение мощности происходит при отражении света от снежного покрытия, то есть при увеличении альбедо. В этот день освещенность без учета снежного покрова была 700 Вт/м². За счет отражения света от поверхности снега прибавка в освещенности составляла более 30 %, то есть освещенность составляла около 1000 Вт/м². При этом модуль вырабатывал меньшую мощность, чем при освещенности 1000 Вт/м² без снежного покрова. На графиках (рис. 5) заметно увеличение мощности модуля за счет отраженного потока от снеговой поверхности, однако коэффициент преобразования падает. Это можно объяснить отличной спектральной составляющей отраженного от снежного покрова света, которая хуже преобразовывается модулем [2].

Данные, полученные в результате проведения настоящих экспериментов, необходимы при расчетах режимов работы и угла установки солнечных модулей в различных регионах России с большими сезонными интервалами температур, наличием пасмурных дней и снежного покрова. Также эти данные позволяют использовать их для расчета годовой выработки электроэнергии солнечными электростанциями [7]. Как видно из данных, конечные значения выработки электроэнергии, при учете указанных в данной статье факторов, могут различаться более, чем на 30 %, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

При движении солнца по небосводу угол падения лучей на плоскую поверхность, установленную под углом, постоянно меняется в течение суток. Ориентировав модуль перпендикулярно солнечным лучам, и изменяя его угол наклона к горизонту, можно имитировать работу модуля в зависимости от изменения угла падения солнечных лучей на его поверхность. Как известно в различных широтах нормаль падения потока солнечной радиации на плоскость рабочей поверхности солнечной установки различна. Поэтому для расчетов мощностных характеристик фотоэлектрических установок можно использовать экспериментальные данные, полученные при изменении угла установки рабочей поверхности по отношению к вектору потока солнечной радиации.

На рис. 6 приведены теоретические и экспериментальные значения различных параметров фотоэлектрического модуля PS 250 в зависимости от угла установки. Экспериментальные данные, полученные для модуля PS 250, показали различие с теоретическими данными при изменении угла установки плоскости модуля отно-

сительно горизонта. Почему это происходит. Для расчетов вырабатываемой мощности солнечной фотоэлектрической батареи используется известная формула [7]:

$$P_{\text{мод}} = E_{\text{о}} \eta_{\text{эл}} S_{\text{мод}} F \cos \alpha_{\text{о}}, \quad (1)$$

где $\eta_{\text{эл}}$ – КПД элементов; $E_{\text{о}}$ – солнечная освещенность; $S_{\text{мод}}$ – площадь солнечной батареи; F – фактор, учитывающий особенности солнечной батареи (заполнение элементами и возможную деградацию ее параметров); $\alpha_{\text{о}}$ – суммарный угол между нормалью к плоскости модуля и падающими солнечными лучами.



Рис. 6. Зависимость изменения выходной мощности фотоэлектрического модуля при изменении угла наклона (при освещенности около 950 Вт/м²).

По экспериментальным данным, угол наклона модуля по отношению к падающим солнечным лучам сильно влияет на показатели модуля, в результате изменяются энергетические и мощностные характеристики, только при перпендикулярном падении лучей на рабочую поверхность экспериментальные и теоретические данные совпадают.

Эти данные получены при максимальной освещенности (около 1000 Вт/м), в таких условиях практически вся диффузная составляющая солнечной радиации отсутствует и модуль преобразует в основном прямые лучи. Как видно из графиков (рис.6), при определенных углах падения реальные значения мощности могут падать в два раза. Формула (1) подходит только для теоретических расчетов. Для фотоэлектрического модуля, имеющего поверх элементов несколько видов защитных покрытий, где каждый тип прозрачного защитного покрытия имеет определенный оптический коэффициент преломления, непосредственно для расчетов фото-

электрических модулей, целесообразно использовать формулу

$$P_{\text{мод}} = E_{\text{о}} \eta_{\text{эл}} S_{\text{мод}} F \cos K \alpha_{\text{о}}, \quad (2)$$

где K – суммарный коэффициент ослабления светового потока, зависящий от конкретной конструкции и количества защитных покрытий модуля.

Коэффициент K отвечает за ослабление солнечной интенсивности при прохождении солнечных лучей через защитные покрытия модуля [7]. Этот коэффициент зависит от конкретной конструкции модуля, а также от количества и формы защитных покрытий.

Выводы

Для электроснабжения потребителей в труднодоступных районах Российской Федерации более эффективно использование фотоэлектрических установок малой мощности, с различными оптимальными углами установки, наиболее приемлемыми для данной местности.

На основе проведенных натурных испытаний при различных климатических условиях были получены данные о наиболее эффективных режимах работы поликремневого фотоэлектрического модуля RS 250, которые показали, то в районах с большим количеством пасмурных дней модули фотоэлектрических установок более эффективно располагать на горизонтальной площадке.

В районах с низкими температурами при проектировании фотоэлектрических станций следует учитывать увеличение КПД фотопреобразователей, и как следствие значительное повышение мощности.

В местностях с значительным снежным покровом, при установке модуля с оптимальным углом наклона, возможно повышение мощностных характеристик модулей до 70 %.

Как показали исследования, угол установки модуля значительно влияет на его вырабатываемую мощность, однако это происходит только в ясные дни при максимальной освещенности. При сильной облачности, для большей выработки, модули эффективнее располагать горизонтально.

Следовательно, при расположении солнечных установок необходимо учитывать количество ясных и пасмурных дней в году.

Используя при проектировании солнечных электростанций полученные экспериментальные данные, можно значительно поднять выработку электрической энергии.

Список литературы

1. Кувшинов В.В. Использование солнечных установок для обеспечения энергетической безопасности Крымского региона и города Севастополя / Кувшинов В.В., Парахнич А.С., Юфев Л.Ю. // *Инновации в сельском хозяйстве*. 2018. № 1 (26). С. 206-211.
2. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун // – М.: Наука, 1985. – 300 с.
3. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощности фотоэлектрических преобразователей модификацией их поверхностей нанокластерами серебра / Кувшинов В.В., Крит Б.Л., Морозова Н.В., Кукушкин Д.Ю., Савкин А.В. // *Вектор науки Тольяттинского государственного университета*. 2018. № 1 (43). С. 36-42.
4. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Косий А.Г. // *Энергетические установки и технологии*. 2017. Т. 3. № 3. С. 73-78.
5. Кувшинов В.В. Изменение мощностных характеристик фотоэлектрических установок при различных климатических факторах / Кувшинов В.В. // *Энергетические установки и технологии*. 2017. Т. 3. № 2. С. 61-66.
6. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).
7. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.
8. Беляев Ю. М. Повышение эффективности использования наземных фотоэлектрических систем / Ю. М. Беляев, А. С. Нагайкин, Ю. В. Разгоняев // *Гелиотехника*. – Ташкент: ФАН, 1989. – №2. – С. 6 – 10.

References

1. Kuvshinov V.V. Use of solar installations to ensure the energy security of the Crimean region and the city of Sevastopol / Kuvshinov V.V., Parahnich A.S., Yuferev L.Y. // *Innovations in agriculture*. 2018. No. 1 (26). Pp. 206-211.
2. Koltun M.M. Optics and metrology of solar cells / M.M. Koltun // - Moscow: Nauka, 1985. - 300 p.
3. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power of photoelectric converters by modifying their surfaces with silver nanoclusters / Kuvshinov V.V., Crete B.L., Morozova N.V., Kukushkin D.Yu., Savkin A.V. // *Vector of the science of Togliatti State University*. 2018. No. 1 (43). Pp. 36-42.
4. Kuvshinov V.V. Investigation of the seasonal operation of the industrial photovoltaic module RS-250 / Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Kosiy A.G. // *Power plants and technologies*.

2017. Т. 3. № 3. P. 73-78.
5. Kuvshinov V.V. Change in power characteristics of photoelectric installations at various climatic factors / Kuvshinov V.V. // *Power plants and technologies*. 2017. Т. 3. No. 2. P. 61-66.
6. Photovoltaic devices from crystalline silicon. The procedure for correction of the results of measuring the current-voltage characteristic (IEC 891-87): GOST 28976-91. - [Enter. 19.04.91]. - Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2004. - 42 p. - (National Standard of Russia).
7. Rauschenbach G. Handbook on the design of solar batteries / G. Rauschenbach // - M.: Energoatomizdat, 1983. - 397
8. Belyaev Yu. M. Increase of the efficiency of the use of terrestrial photoelectric systems / Yu. M. Belyaev, AS Nagaikin, Yu. V. Razgonyaev // *Heliotechnics*. - Tashkent: FAN, 1989. - №2. - P. 6 – 10.

УДК 620.92

Современное состояние и направления развития фотоэлектрических энергоустановок

П.Н. Кузнецов, Е.В. Гусева, А.А. Борисов

*ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, pavelnik2@gmail.com*

Статья поступила 10.09.2018 г

Аннотация

В статье рассмотрено современное состояние фотоэнергетики, а также основные направления её развития. Обоснована целесообразность использования данного источника электрической энергии. Приведены данные об установленной мощности фотоэлектрических станций в России и мире, удельной стоимости фотоэлектрических установок, а также значения их эффективности в разные годы. Описаны основные технологические решения повышения эффективности фотоэлектрических установок, а также ряд факторов, затрудняющих их внедрение.

Ключевые слова: фотоэлектрические установки, фотоэнергетика, современное состояние, направления развития.

Current state and development trends of photovoltaic power plants

P.N. Kuznetsov, E.V. Guseva, A.A. Borisov

*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
pavelnik2@gmail.com*

Received 10.09.2018 г

Abstract

The article describes the current state of photovoltaics, as well as the main directions of its development. It is justified the expediency of using this source of electrical energy. It is given the data on the installed capacity of photovoltaic stations in Russia and the world, the unit cost of photovoltaic installations, as well as the values of their efficiency in different year. The main technological solutions for increasing the efficiency of photovoltaic installations are described, as well as a number of factors that complicate their implementation.

Keywords: PV installations, photovoltaics, state of the art, trends.

Введение

В настоящее время одной из важнейших задач Российской Федерации является обеспечение энергетической безопасности ее регионов. Существующая электроэнергетическая система, ввиду своего износа, нуждается в модернизации и развитии, и решить эту задачу не способна. В связи с этим одним из приоритетных направлений развития энергетической стратегии России является повсеместное внедрение малой распределенной энергетики, с генерирующими установками,

расположенными в непосредственной близости от потребителей. В данную концепцию удачно вписывается использование солнечных фотоэлектрических установок.

Преимуществами таких установок являются экологичность, что позволяет использовать его практически в любых масштабах, не принося ущерба окружающей среде, и «доступность почти в каждой точке нашей планеты, различаясь по плотности излучения не более чем в два раза» [1].

В Российской Федерации достаточно много районов, где среднегодовой приход

солнечной энергии составляет 4-5 кВт·ч на квадратный метр в сутки, этот показатель является довольно высоким и соизмеримым с показателями в странах-лидерах по внедрению солнечных энергетических систем. Всё это говорит о целесообразности развития солнечной энергетики в нашей стране. К тому же модульная конструкция фотоэлектрических установок позволяет их проектировать практически на любую мощность, что делает эти установки универсальным и надежным решением, находящим широкое применение, как в промышленном производстве электроэнергии, так и в небольших системах энергообеспечения.

Цель и задачи исследования

Целью данной работы является систематизация и оценка состояния и направления развития фотоэлектрических установок в России и мире, а также анализ факторов, препятствующих их повсеместному использованию.

Для достижения данной цели необходимо систематизировать существующие и прогнозируемые экономические, экологические и социальные эффекты от использования солнечных фотоэлектрических установок, основанные на различных технологиях.

Современное состояние

Мировое развитие энергетических установок, работающих от ВИЭ, показывает, что одной из наиболее динамично развивающихся отраслей этого направления энергетики является солнечная фотоэнергетика. В течение последних десяти лет в мире ежегодный прирост выработки электроэнергии за счет этого источника достигает 20-30% (рис. 1) с ожидаемым выходом к 2040 году на уровень 6,2% мирового производства электроэнергии [2].

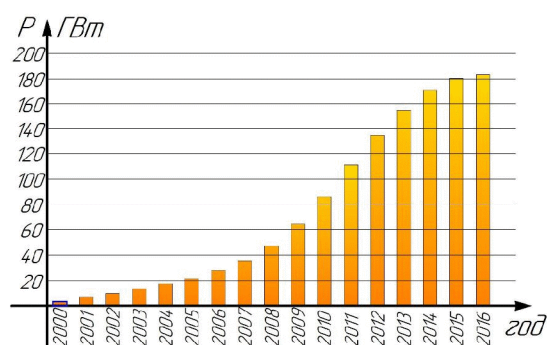


Рис. 1. Установленная мощность фотоэлектрических станций

Лидирующую позицию, как по вводу новых мощностей солнечной энергетики, так и по установленной мощности занимает Китай. Ожидается, что установленная мощность солнечных электростанций в этой стране составит 110 ГВт к 2020 г. Интенсивный рост также ожидается в странах АТР, включая Индию, США и некоторых европейских странах, таких как Соединенное Королевство и Германия.

Поддержку данной отрасли оказывают как частные инвесторы, так и государства. В настоящее время, разработано большое количество новых технологий, направленных на повышение энергетической эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, приближая эту ветвь энергетики к рентабельности. Данные МЭА показывают, что нормированная стоимость электрической энергии (LCOE), генерируемая фотоэлектрическими станциями, с 2010 по 2015 г снизилась на 65%, почти «вплотную приблизившись» к аналогичному показателю ископаемых видов топлива [1,3]. Подтверждением этих данных являются результаты проведенного исследования Bloomberg new energy finance за II квартал 2015 г., показывающие, что в некоторых странах солнечная энергетика полностью конкурентоспособна с газовой и угольной. К примеру, в Китае показатель LCOE солнечной энергетики составил 109 долл., в то время как «газовое электричество» стоит 113 долл. за 1 МВт·ч. В Германии LCOE солнечной энергетики составил 95-115 долл., газовый -118 долл., а угольный - 106 долл. за 1 МВт·ч [2].

Также следует отметить, что существующие расчеты экономической эффективности солнечных установок и установок, работающих на традиционном топливе (нефть, газ, ядерное топливо и т.д.) представляются достаточно неточными. Такие выводы связаны с тем, что в них не учитывается ряд скрытых косвенных затрат, связанных с последствиями вредного воздействия на окружающую среду и здоровье людей. Включение в существующие тарифы на электрическую энергию таких составляющих как оплата экологического ущерба, затраты на медицинское обслуживание и др., делает уже сегодня солнечную энергетику достаточно конкурентоспособной с традиционной.

В Российской Федерации масштабы развития фотоэнергетики пока невелики, в сравнении с показателями в странах-лидерах отрасли. Это связано с тем, что солнечные электростанции устанавливаются не повсеместно, а в энергетически изолированных регионах и местах с наибо-

лее благоприятными природно-климатическими условиями, где их использование характеризуется высокими значениями эффективности [1].

Наибольшую долю рынка строительства солнечных электростанций в России занимает компания ГК «Энергия Солнца», на которую приходится 35,5 % проектов, далее идут ООО «Авелар Солар Технолоджи» (ГК «Хевел» – 29,5% и «Солар Системс», занимающая 20,3%.

В настоящее время в России введены в эксплуатацию одиннадцать промышленных солнечных электростанций (СЭС), передающие энергию в Единую энергетическую систему (ЕЭС) России: «Белгородская» СЭС, установленной мощностью 100 кВт, введена в 2010 г. (ООО «АльтЭнерго», Белгородская обл., Яковлевский район, х. Крапивненские дворы); «Наримановская» СЭС, установленной мощностью 250 кВт, введена в 2014 г. (ГК «Энергия Солнца», Астраханская обл.); «Кош-Агачская» СЭС, установленной мощностью 10 МВт, первая очередь введена в 2014 г., вторая – в 2015 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Алтай, Кош-Агачский район, Теленгит-Сортогойское сельское поселение); «Переволоцкая» СЭС, установленной мощностью 5 МВт, введена в 2015 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Оренбургская обл.); «Бурибаевская» СЭС, установленной мощностью 20 МВт, первая очередь введена в 2015 г., вторая – в 2016 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Башкортостан, Хайбуллинский район, с. Бурибай); «Орская» («Сакмарская») СЭС, установленной мощностью 25 МВт, введена в эксплуатацию в 2015 г. (ПАО «Т Плюс», Оренбургская обл., г. Орск); «Абаканская» СЭС, установленной мощностью 5,198 МВт, введена в эксплуатацию в 2015 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», респ. Хакасия, г. Абакан); «Бугульчанская» СЭС, установленной мощностью 15 МВт, первая очередь введена в 2015 г., вторая – в 2016 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Башкортостан, Куюргазинский район, с. Бугульчан), «Усть-Канская» СЭС, установленной мощностью 5 МВт, введена в 2016 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Алтайский край); «Грачевская» СЭС, установленной мощностью 10 МВт, введена в 2017 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Оренбургская обл.); «Плешановская» СЭС, установленной мощностью 10 МВт, введена в 2017 г. (ООО «Авелар Солар Технолоджи», Оренбургская обл.) [4].

Также необходимо отметить крупные солнечные электростанции, поставляющие электроэнергию в Крымскую энергосистему, имею-

щие большое значения для Крымского региона, являющегося одновременно регионом военного и рекреационного значения, требующего повышения энергетической безопасности посредством создания собственных рассредоточенных энергогенерирующих установок, не наносящих вреда экосистеме полуострова [12]. В настоящее время в Крыму построено семь фотоэлектрических станций (включая «Севастопольскую» СЭС, ООО «С. Энерджи-Севастополь»), суммарной установленной мощностью 410 МВт, из которых 300 МВт введены в эксплуатацию, покрывающие более 5 % потребности электроэнергии региона [5].

В перспективных планах развития электроэнергетики России, согласно «дорожной карте» Национальной технологической инициативы «Энерджинет» предусмотрен переход на интеллектуальные активно-адаптивные сети «Smart Grid», предполагающие увеличение масштабов использования ВИЭ и, в частности, фотоэнергетики [6]. До 2020 г. включительно в РФ планируется ввод более пятидесяти солнечных электростанций, суммарной установленной мощностью 1520 МВт [7].

Более широкому внедрению солнечных электростанций препятствует ряд причин, основными из которых являются: высокая стоимость, низкий КПД, несовершенство технологий накопления энергии.

Специалистами различных стран, включая Россию, ведется работа по снижению влияния изложенных факторов. Большой вклад в этом направлении внесли А.Ф. Иоффе, Ж.И. Алферов, Д.С. Стребков, Г. Раушенбах, М. Принс, А.П. Ландсман, Дж. Лоференский, В.В. Харченко, В.А. Майоров и др.

Направления развития

На рис. 2 помещена диаграмма, показывающая динамику изменения удельной стоимости солнечных установок и модулей с кремниевыми фотоэлементами.

Из диаграммы видно, что снижение стоимости как установок, так и модулей происходит быстрыми темпами за счет их технологического и технического совершенствования, что подтверждают значения эффективности модулей, изготовленных в разное время (рис. 3) [8].

Одной из основных тенденций развития фотоэнергетики в мире является создание новых технологий изготовления фотоэлектрических элементов и модулей. Она направлена на уменьшение стоимости и повышении КПД.

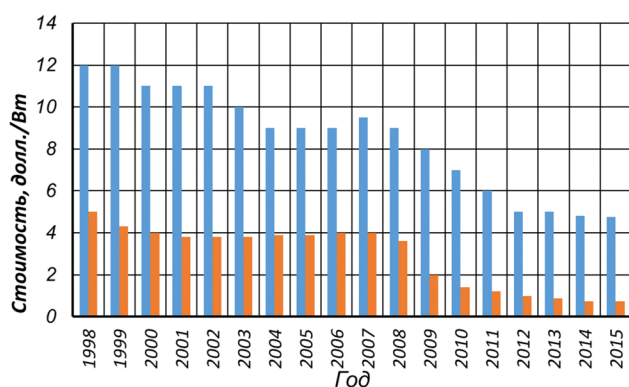


Рис. 2. Динамика изменения удельной стоимости солнечных установок (■) и модулей с кремниевыми фотоэлементами (■).

В первой половине XX века КПД фотоэлементов составлял не более 1%. В настоящее время средний показатель КПД самых распространенных кремниевых элементов составляет 14-18%. Элементы, изготовленные на основе каскадных гетероструктур, имеют эффективность до 36,9%, а с использованием арсенида галлия (GaAs) до 47,5%. Теоретический КПД наземных каскадных солнечных элементов составляет 49 % [9].

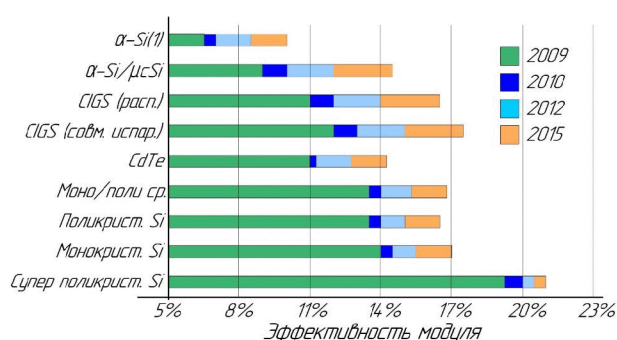


Рис. 3. Значения эффективности модулей

При этом необходимо отметить, что стоимость таких установок является все ещё высокой, что призывает продолжать вести работы в данном направлении. Причем в совершенствовании нуждаются не только фотоэлектрические модули, но и все дополнительные элементы, входящие в установку – преобразовательные устройства, опорные конструкции, системы аккумулирования энергии и многие другие, значительно влияющие на её стоимость в целом. Данные Международного агентства по возобновляемым источникам энергии (IRENA) показывают, что стоимость солнечной установки может до четырех-пяти раз превышать стоимость модулей [8].

Усовершенствование дополнительных элементов фотоэлектрических установок, кроме снижения стоимости, должно быть направлено на повышение надежности и стабильности энерговыдачи в условиях изменяющихся параметров окружающей среды, или воздействия внешних факторов (затенение, загрязнение и т.д.), а также на достижение максимальной энергетической эффективности. С этой целью в последние годы был создан ряд новых устройств и технологий, основными из которых являются [4,10,11]:

- применение солнечных концентраторов;
- использование активных систем слежения за солнцем;
- использование многорядных конструкций.

Солнечные концентраторы позволяют увеличить интенсивность излучения, поступающего на фотоэлектрические преобразователи, увеличивая количество получаемой от них электрической энергии. К тому же концентрированное излучение увеличивает значение КПД преобразования солнечного излучения.

Однако, при всей кажущейся привлекательности, использование солнечных концентраторов не получает широкого применения в промышленной генерации электроэнергии фотоэлектрическими установками. Это связано с тем, что их использование требует значительно усложнения конструкции установок и их эксплуатации, увеличением материалоемкости и затрат на изготовление концентраторов (особенно, имеющих сложную геометрию), наличия дополнительных средств отвода тепла, необходимость довольно точной ориентации на Солнце и т.д. Кроме этого, наиболее распространенные кремниевые фотоэлементы, не рассчитаны на работу в условиях концентрированного излучения, что требует использования значительно более дорогих фотоэлектрических преобразователей.

Использование активных систем слежения за солнцем, также позволяет получать большее количество электрической энергии от фотоэлектрических установок за счет обеспечения поступления большего количества солнечного излучения на поверхность солнечных элементов. Кроме того, такие системы увеличивают дневной интервал энерговыработки.

Основными недостатками использования систем слежения являются их высокая стоимость (в большинстве случаев, в два и более раза превышающая стоимость модулей), необходимость регулярного дорогостоящего сервисного обслуживания (обычно, не реже раза в два

года), снижение надежности. Также, широкому использованию данных систем, в промышленной генерации электрической энергии фотоэлектрическими преобразователями, препятствует тот факт, что их использование приводит к взаимному затенению, при относительно близком поперечном размещении установок. Следствием этого является существенное снижения вырабатываемой мощности всей солнечной электростанции, как будет показано в последующих разделах. Более редкое размещение на территории станции является также не эффективным решением, вследствие снижения удельной мощности, что приводит к увеличению площади и дополнительным электрическим потерям.

Ещё одним способом увеличения эффективности фотоэлектрических установок является увеличение их удельной мощности. Для этого используют многорядные конструкции, позволяющие размещать фотоэлектрические модули в несколько рядов на одной опоре. Такое решение также позволяет уменьшить общую стоимость несущих конструкций, за счет снижения материалоемкости и трудозатрат на строительные и монтажные работы.

Несмотря на преимущества таких конструкций, их использование может являться причиной значительного снижения энерговыработки солнечных электростанций [10]. Это связано с тем, что при небольших значениях высоты солнца происходит затенение фотоэлектрических модулей нижнего ряда (рис. 4). Исследования проектов мировых солнечных электростанций, в совокупности с географическими данными, показывают, что около 70% из них работают в таких условиях достаточно продолжительный период в течение года.

В этом случае, на значение величины возникающих энергетических потерь, основное влияние оказывает вариант расположения фотоэлектрических модулей (вертикальный или горизонтальный) и вариант коммутации (рядный, или блочный). При этом влияет не само расположение модулей, а направление коммутации солнечных элементов в них, схема включения шунтирующих диодов и их количество. Однако в связи с тем, что подавляющее большинство промышленных модулей имеют направление коммутации солнечных элементов вдоль большей стороны, образуя три равные последовательные группы с параллельно включенными шунтирующими диодами, можно считать, что имеет значение именно расположение модулей.



Рис. 4. Затенение фотоэлектрических модулей на солнечных электростанциях

Выводы

Таким образом, анализ современного состояния развития фотоэнергетики в мире показывает, что данная отрасль является одним из самых быстроразвивающихся секторов возобновляемой энергетики. Однако её развитие в широком масштабе возможно только при той или иной форме государственной поддержки.

При этом, в настоящее время, разработано большое количество новых технологий, направленных на повышение энергетической эффективности преобразования солнечной энергии в электрическую, приближая эту ветвь энергетики к рентабельности. Однако анализ основных способов повышения эффективности показывает, что их использование, также затруднено рядом проблем, решение которых является важной задачей для дальнейшего развития промышленной фотоэнергетики.

Список литературы

1. Развитие солнечной энергетики / Гимади В., Амирагян А., Поминова И. и др., под ред. Григорьев Л. - 44 изд. - М.: Аналитический центр при правительстве российской федерации, 2017. - 27 с.
2. IRENA - International Renewable Energy Agency [Электронный ресурс]. URL:

<http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>

3. Solar energy // International Energy Agency [Электронный ресурс]. URL: <https://3/www.ica.org/topics/renewables/solar/>
4. Кузнецов П.Н. Повышение энергетической эффективности фотоэлектрических станций, работающих в условиях неравномерной освещенности: дис. кандидата технических наук. ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Севастополь, 2018.
5. Крым располагает высоким потенциалом развития альтернативных источников энергии // Министерство топлива и энергетики Республики Крым. [Электронный ресурс] URL: <http://mtop.rk.gov.ru/rus/index.htm/news/300719.htm>
6. Дорофеев В.В. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России / В.В. Дорофеев, А.А. Макаров // Бесплатная электронная версия журнала «Энергоэксперт» № 4, 2009 – С. 28-34.
7. Перечень проектов ВИЭ, отобранных по результатам ОПВ, проведенного в 2016 году // АО «АТС» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults>
8. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Solar Photovoltaics. June, 2012. Volume 1: Power Sector Issue 4/5. «IRENA», United Arab Emirates June, 2012.
9. Алферов, Ж.И. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики / Ж.И. Алферов, В. М. Андреев, В.Д. Румянцев // Физика и техника полупроводников. –2004. –Т.38. –№ 8. – С. 937-948.
10. Кузнецов, П.Н. Исследование повышения эффективности фотоэлектрических установок, работающих в условиях частичного затенения /П.Н. Кузнецов, Л.Ю. Юферев //Вестник аграрной науки Дона. – 2018. – №42. – С. 12-22.
11. Кузнецов, П.Н. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении /П.Н. Кузнецов, Л.Ю. Юферев //Вестник аграрной науки Дона. – 2017. – №37. – С. 15-25.
12. Кузнецов, П.Н. Применение фотоэлектрических водоподъемных установок для орошения в Республике Крым, работающих в условиях частичного затенения /П.Н. Кузнецов, Л.Ю. Юферев //Вестник ВИЭСХ. – 2018. – №1(30). – С. 83-88.

References

1. The development of solar energy / Gimadi V., Amiragyan A., Pominova I. et al., Ed. Grigoriev L. - 44 ed. - M.: Analytical Center under the government of the Russian Federation, 2017. - 27 p.
2. IRENA - International Renewable Energy Agency. URL: <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/>
3. Solar energy // International Energy Agency [Электронный ресурс]. URL: <https://3/www.ica.org/topics/renewables/solar/>
4. Kuznetsov P.N. Increase of energy efficiency of photovoltaic stations operating in conditions of uneven illumination: dis. Candidate of Technical Sciences. FGAOU VO Sevastopol State University, Sevastopol, 2018.
5. Crimea has a high potential for the development of alternative energy sources // Ministry of Fuel and Energy of the Republic of Crimea. URL: <http://mtop.rk.gov.ru/eng/index.htm/news/300719.htm>
6. Dorofeev V.V. Active-adaptive network - a new quality of the UES of Russia / V.V. Dorofeev, A.A. Makarov // Free electronic version of the magazine "Energoekspert" № 4, 2009 - P. 28-34.
7. List of renewable energy projects selected based on the results of OPV conducted in 2016 // ATS. URL: <https://www.atsenergo.ru/vie/proresults>
8. Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series. Solar Photovoltaics. June, 2012. Volume 1: Power Sector Issue 4/5. «IRENA», United Arab Emirates June, 2012.
9. Alferov, Zh.I. Tendencies and prospects for the development of solar photovoltaics / Zh.I. Alferov, V. M. Andreev, V.D. Rumyantsev // Physics and Technology of Semiconductors. -2004. -T.38. - No. 8. - P. 937-948.
10. Kuznetsov, P.N. A study of increasing the efficiency of photovoltaic installations operating under partial-voltage conditions. Kuznetsov, L.Yu. Yuferev // Bulletin of Agrarian Science of the Don. - 2018. - № 42. - P. 12-22.
11. Kuznetsov, P.N. Increase of efficiency of work of photoelectric converters at consecutive connection /П.Н. Kuznetsov,

- L.Yu. Yuferev // Bulletin of Agrarian Science of the Don. - 2017. - №37. - P. 15-25.
12. Kuznetsov, P.N. Application of photovoltaic water-lifting installations for irrigation in the Republic of Crimea, operating under conditions of partial shading /P.N. Kuznetsov, L.Yu. Yuferev // Vestnik VIESH. - 2018. - No. 1 (30). - P. 83-88.

УДК 621.311

Повышение эффективности гибридных электростанций с помощью аккумулирующих устройств

А.В. Новых¹, Х.А. Мендес Перез¹, Б. Гонзалез-Диаз¹, И.И. Свириденко²,
Г.В. Гоголев², В.А. Тимофеев²

¹ Университет Ла-Лагуна, Калле Ираклио Санчес, 43,
г. Сан-Кристобаль-де-ла-Лагуна, Санта-Крус-де-Тенерифе, 38204, Испания, Alexandr.novykh@gmail.com
² ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, i.sviridenko@mail.ru

Статья поступила 03.09.2018 г.; после доработки 10.09.2018 г.

Аннотация

Основная проблема заключается в существенном изменении во времени потребности в электрической энергии и низкой эффективности методов преобразования исходной энергии в электрическую. В статье анализируются проблемы повышения эффективности локальных электрогенерирующих систем. На примере реализованного на острове El Hierro (Канарские острова, Испания) проекта гибридной электростанции рассматриваются методы повышения эффективности генерации электрической энергии и повышения эффективности использования энергетического оборудования за счет применения различных типов аккумуляторов энергии.

Ключевые слова: аккумулирование энергии, гибридная электроэнергетическая установка, гидроаккумулирующая станция, аккумулятор сжатого воздуха, пневмогидравлический аккумулятор.

Increasing the efficiency of hybrid power plants using accumulating devices

A.V. Novykh¹, J.A. Mendez Perez¹, B. Gonzalez-Diaz¹, I.I. Sviridenko²,
G.V. Gogolev², V.A. Timofeev²

¹ University of La Laguna, Calle Heraclio Sanchez, 43, San Cristobal de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, 38204, Spain, Alexandr.novykh@gmail.com ² Sevastopol State University, 33, Universitetskaja st., Sevastopol, 299053, Russia, i.sviridenko@mail.ru

Received 03.09.2018 y.; received in final form 10.09.2018 y.

Abstract

The main problem is a significant change in time in the need for electrical energy and low efficiency of methods of converting the initial energy into electrical energy. The article analyzes the problems of increasing the efficiency of local electrogenerating systems. Using the example of a hybrid power plant project implemented on the island of El Hierro (Canary Islands, Spain), methods for increasing the efficiency of generating electric power and improving the efficiency of using power equipment by using various types of energy storage batteries are considered.

Keywords: energy storage, hybrid electricity generating unit, pumped-storage unit, air accumulator, pneumatic-hydraulic accumulator.

Введение

Современные технологии производства тепловой энергии обладают достаточно высокой эффективностью использования исходного топ-

лива. Однако эффективность существующих электрогенерирующих установок пока остается сравнительно низкой. Коэффициент полезного действия традиционных электрогенераторов на сегодня не превышает 40-60 %. Кроме этого, по-

тери электрической энергии в процессе транспортировки к потребителю составляют не менее 10 %. Это означает, что при производстве электроэнергии около половины исходного топлива бесполезно сжигается и выбрасывается в атмосферу в виде продуктов сгорания и низкопотенциальной тепловой энергии. Подобное неэффективное использование ископаемых видов топлива создает и серьезные экологические проблемы.

Ключевой проблемой в решении задачи повышения эффективности электрогенерирующих установок остается суточная неравномерность потребления электроэнергии. Особенно остро эта проблема стоит для локальных энергорайонов, не входящих в объединенные энергетические сети. В большинстве случаев в таких районах установленная мощность электрических генераторов используется менее чем на 50 %.

Одним из методов повышения эффективности генерации электрической энергии и повышения эффективности использования энергетического оборудования является использование аккумуляторов энергии. Однако практически все известные методы аккумулирования энергии имеют как свои преимущества, так и недостатки.

Целью статьи является анализ методов повышения эффективности электрогенерации за счет применения различных технологий аккумулирования энергии.

Основные проблемы повышения эффективности электроэнергетики

Главной проблемой современной энергетики является низкий уровень полезного использования исходного топлива или исходного источника энергии.

Единственной технологией производства электрической энергии, которая позволяет почти без потерь использовать исходное топливо, является когенерация. Коэффициент полезного действия когенерационной установки составляет не менее 95 %.

К сожалению, область применения подобной технологии пока ограничена, что негативно сказывается на решении задачи повышения эффективности электрогенерирующих установок.

Необходимо развивать эту технологию и создавать гибридные когенерационные установки путем комбинирования нескольких видов энергетических компонентов, обладающих примерно одинаковыми характеристиками.

При широком использовании такой технологии уровень выбросов углекислого газа в атмосферу можно снизить более чем в два раза.

Вторая проблема современной электроэнергетики заключается в низкой степени использования установленной мощности. Установленная мощность современных электростанций используется менее чем на 50 %. На рис. 1 приведен характерный график потребления электрической энергии в течение суток [1]. Мощность электрогенераторов определяется исходя из максимальной нагрузки, которая в действительности необходима в течение только 2-3 часов. Все остальное время суток оборудование работает на частичных нагрузках существенно ниже максимальной нагрузки и, соответственно, с гораздо меньшей эффективностью.

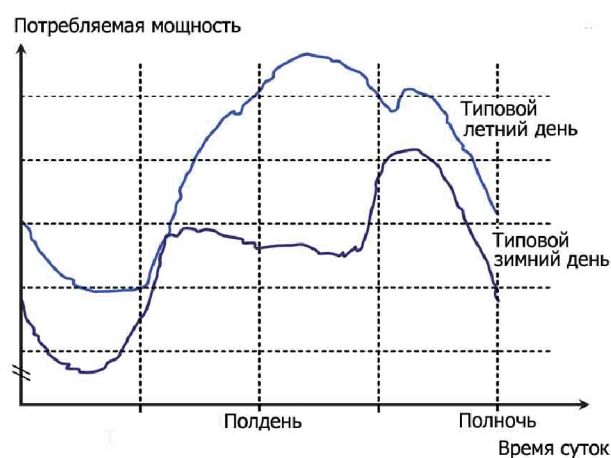


Рис. 1. Типовой график потребления электрической энергии в течение суток [1].

Третья проблема, проявившаяся только в последние годы, заключается в децентрализации электроэнергетики. До недавнего времени энергетическая промышленность развивалась строго централизованно и все основные энергетические мощности были сконцентрированы в основном в крупных энергетических компаниях. Быстрое развитие возобновляемой энергетики позволило частным лицам и небольшим компаниям размещать у себя собственные электростанции малой мощности.

Иными словами, начался процесс децентрализации энергетической области, который в дальнейшем будет активно развиваться. И это, в свою очередь, приведет к конфликту интересов между крупной и малой электрогенерацией, который только усугубит существующие проблемы энергетики.

На рис. 2 представлен типовой график электрической нагрузки в сети с учетом работы малых частных электростанций [2]. График был опубликован еще в 2013 году с прогнозом развития до 2020 года (темные линии – прогноз). Из

графика видно, что в дневное время потребление электрической энергии из сети резко падает, что связано с активной работой в это время небольших солнечных электростанций.

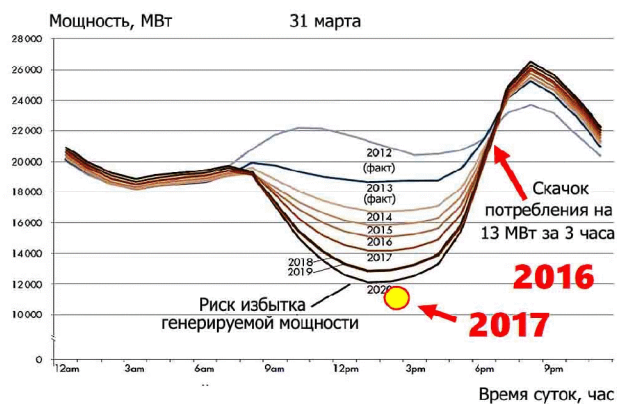


Рис. 2. Типовой график электрической нагрузки в сети с учетом работы малых частных электростанций [2].

Потребители массово отключаются от электрической сети и переходят на использование собственной электрической энергии. Подобная ситуация создает серьезные проблемы крупным электростанциям.

К сожалению, этот прогноз оказался не таким оптимистичным. В действительности уже в 2017 году были зафиксированы более глубокие провалы нагрузки в дневное время.

Применение аккумулирования энергии

Решить рассмотренные выше проблемы, причем как традиционной, так и возобновляемой энергетики, позволяет метод аккумулирования энергии. В настоящее время практически все мировые научные центры энергетического сектора ведут интенсивные работы по созданию различных устройств аккумулирования энергии. Для этого используются самые разнообразные технологии. Однако высокоэффективных и дешевых устройств аккумулирования энергии пока не создано.

В последнее время опубликован ряд работ, содержащих анализ различных технологий аккумулирования энергии. Наиболее детально этот вопрос представлен в [3]. На рис. 3, 4 и 5 в графическом виде представлены обобщенные результаты этих исследований.

Подавляющее большинство реализуемых сегодня проектов хранения энергии использует технологию гидроаккумулирования, которая является сравнительно простой и достаточно освоенной. Характерным примером реализации такой технологии является гидроаккумулирующая электростанция на острове El Hierro (Канарские острова, Испания) [4].

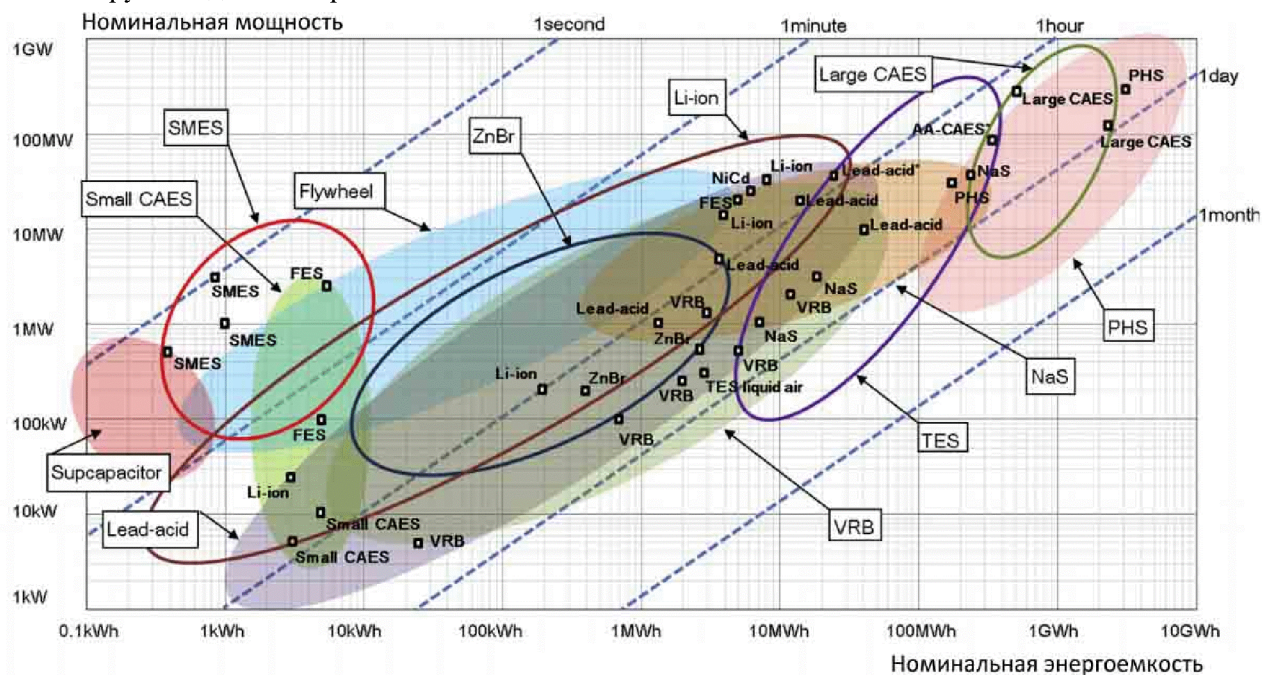


Рис. 3. Сравнение различных технологий аккумулирования энергии: зависимость номинальной мощности от номинальной энергоемкости и продолжительности времени разряда при номинальной мощности [3]

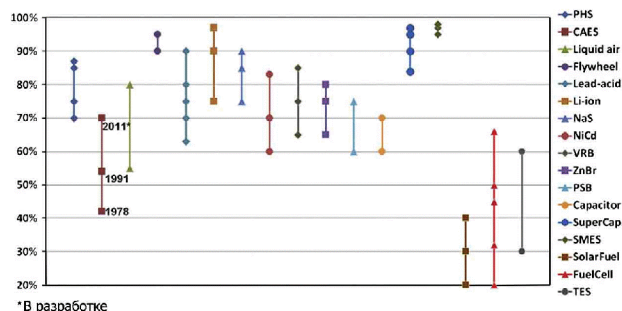


Рис. 4. Эффективность хранения электроэнергии при использовании различных технологий аккумуляции [3].

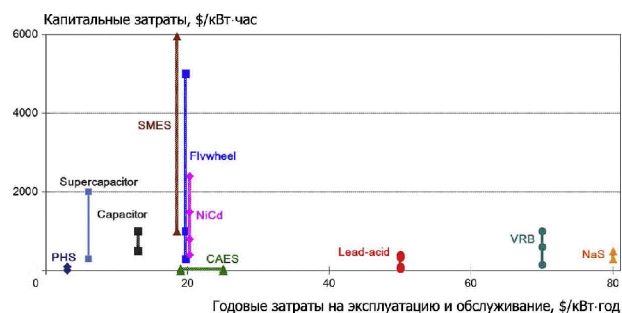


Рис. 5. Экономические показатели различных технологий хранения энергии [3].

Проект включает в себя традиционную дизельную электростанцию мощностью 10 МВт, ветрогенераторы суммарной мощностью 11,5 МВт, насосную станцию мощностью 6 МВт, гидроэлектростанцию мощностью 10 МВт и два резервуара воды емкостью: 150000 м³ – нижний и 380000 м³ – верхний, соответственно (рис. 6).

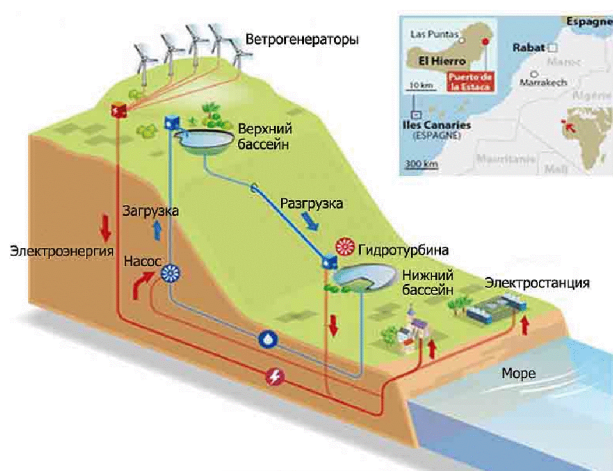


Рис. 6. Принципиальная схема гибридной электростанции острова El Hierro [4].

При наличии сильного ветра эта гибридная электростанция может обеспечить население острова необходимым количеством

электрической энергии из возобновляемых источников, причем дизельная электростанция в этих условиях полностью отключается.

Излишки электроэнергии, производимой ветрогенераторами, накапливаются в гидравлических аккумуляторах путем перекачивания воды из нижнего водоема в верхний.

При недостатке электрической энергии вода пропускается через гидравлические турбины, вырабатывающие дополнительную электроэнергию.

Дизельгенераторы включаются только в случае недостатка электрической энергии, произведенной возобновляемыми источниками. Таким образом, дизельгенераторы используются только в качестве резервного источника энергии.

Следует заметить, что некоторые специалисты критикуют данный проект [5]. Главным предметом критики является его высокая стоимость.

По разным источникам на реализацию проекта потрачено от 54 до 85 миллионов евро. Это – очень большие затраты, но в научном и практическом плане указанный проект является уникальным и, бесспорно, показательным и важным.

Уникальность и практическая ценность данного проекта заключается в следующем.

1) Проект представляет собой замкнутую энергетическую систему, расположенную на небольшом острове, где отсутствует возможность переброски излишков электрической энергии в другие регионы, как это делается на материке. Поэтому аккумуляция энергии является весьма важным элементом подобной энергетической системы. И учитывая тенденцию к децентрализации энергетики, этот проект является перспективным.

2) Доля электрической энергии, полученной из возобновляемых источников, составляет в отдельные периоды времени от 70 до 100 %, что является очень высоким показателем. На материковой части Европы этот показатель пока не превышает 20 %. Следовательно, эксплуатация гибридной электростанции на острове El Hierro позволяет получить практический опыт работы замкнутой энергетической системы, когда доля возобновляемой энергетики сопоставима или превышает долю традиционной энергетики.

3) Реализация проекта гибридной электростанции на острове El Hierro обеспечило создание уникальной базы для испытания других технологий аккумуляции энергии. И при незначительной доработке данного проекта можно существенно повысить его эффективность.

Сегодня гибридная электростанция на острове El Hierro имеет огромный потенциал для повышения своей эффективности. Уже подготовлен ряд технических предложений, реализация которых позволит значительно повысить ее производительность и эффективность.

Анализ методов повышения эффективности гибридной электростанции

Рассмотрим подробнее возможные способы повышения эффективности подобной гибридной электростанции.

КПД дизельной электростанции составляет 45-55 %. Около половины энергии сжигаемого топлива выбрасывается в атмосферу с выпускными газами и охлаждающей водой. При этом температура выпускных газов составляет не менее 350-400 °С, а температура охлаждающей воды варьируется от 50 до 90 °С. За час работы такой дизельной электростанции на полной мощности в атмосферу выбрасывается около 10 МВт·ч тепловой энергии, что представляет собой огромные потери, которые можно использовать для повышения эффективности всего энергетического комплекса.

Потери гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС, PHS – Pumped Hydroelectric Storage), занимающих сегодня лидирующее место среди всех технологий аккумулирования энергии (рис. 7), связаны в основном с гидравлическими потерями в трубопроводах и насосах. Подобный способ аккумулирования имеет коэффициент полезного действия от 70 до 87 % (рис. 4), следовательно, при каждой «зарядке» гидравлического аккумулятора теряется от 13 до 30 % электрической энергии.

Как показывает практика эксплуатации этой гибридной электростанции, емкость верхнего водоема позволяет аккумулировать до 50 МВт·ч электрической энергии, что составляет около 50 % дневной потребности острова El Hierro. При каждой «зарядке» гидроаккумулятора будет теряться не менее 10-15 МВт·ч, что также является существенными потерями, тем более что «зарядка» и «разрядка» гидроаккумулятора происходит не реже, чем один раз в несколько дней, а иногда и ежедневно.

В рассматриваемом проекте практически не используется энергия солнца, хотя потенциал ее на острове El Hierro огромный. Особенно это касается тепловой энергии солнца, которая может быть полезно использована.

Как видно из рис. 7, второй по степени использования после ГАЭС является технология

аккумулирования энергии с применением сжатого воздуха (CAES – Compressed Air Energy Storage) [6, 7]. Пока эта технология не получила широкого применения из-за ряда существенных недостатков и сегодня проводятся исследования по ее совершенствованию. Интерес к ней объясняется тем, что на сегодня – это единственная технология хранения энергии, которая позволяет получить при определенных условиях коэффициент полезного действия более 100 %.

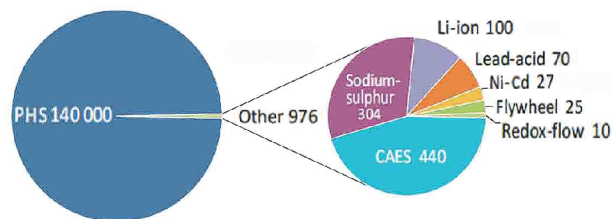


Рис. 7. Применение различных технологий аккумулирования энергии в энергосистемах.

Основная проблема технологии аккумулирования энергии с использованием сжатого воздуха заключается в том, что в процессе сжатия воздух нагревается до высокой температуры. Фактически 75 % энергии, которая необходима для сжатия воздуха, в итоге превращается в тепловую энергию. В процессе хранения сжатый воздух неизбежно остывает и теряет свой энергетический потенциал. В силу этого первые проекты аккумулирования энергии с использованием энергии сжатого воздуха имели коэффициент полезного действия не более 50 %. Кроме того, при использовании сжатого воздуха, накапливаемого в баллонах, невозможно обеспечить постоянство давления на выходе из резервуара. По мере расходования сжатого воздуха давление на выходе из резервуара будет неизбежно падать.

Первую проблему можно решить путем использования изотермического сжатия. Наиболее просто реализуется многоступенчатое сжатие воздуха с промежуточным охлаждением после каждой ступени [8]. Этот процесс известен и достаточно исследован. Однако каждый промежуточный охладитель воздуха имеет большое гидравлическое сопротивление, что является причиной дополнительных потерь.

Интересные результаты получены при использовании впрыска мелкодисперсной струи воды непосредственно в цилиндр компрессора (рис. 8). В этом случае обеспечивается идеальный изотермический процесс сжатия воздуха с минимальными затратами: вода в цилиндре компрессора испаряется и температура воздуха в процессе сжатия остается постоянной [9, 10].

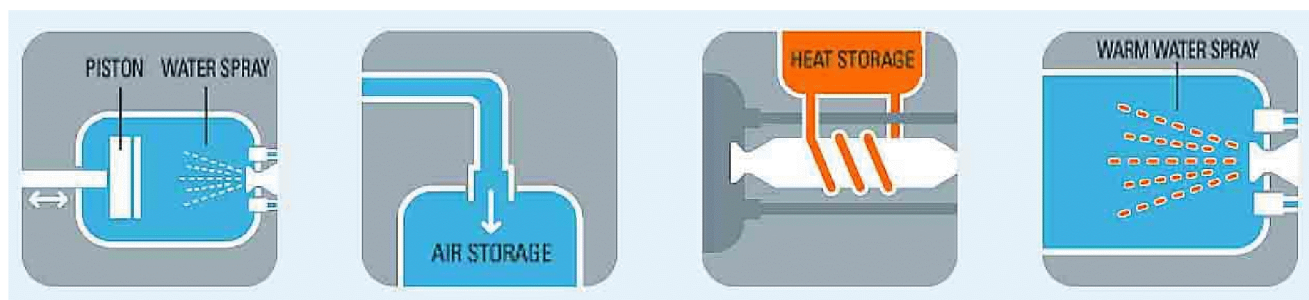


Рис. 8. Метод повышения эффективности гибридной электростанции за счет реализации процесса изотермического сжатия с впрыском воды в цилиндр компрессора.

Но у этого метода есть серьезный недостаток. В процессе хранения сжатого воздуха пары воды конденсируются и давление в ресивере падает. Однако если воздух перед использованием дополнительно подогреть за счет внешнего теплового источника, то давление в ресивере восстановится. Внешним источником может служить солнечная энергия, выпускные газы дизельгенератора, либо тепловые выбросы промышленного производства.

Такой подогрев обеспечит существенное повышение суммарной эффективности рассмотренной технологии аккумулирования.

Наиболее перспективным на наш взгляд является повышение эффективности гибридной электростанции за счет реализации процесса сжатия предварительно охлажденного воздуха. Чем ниже температура воздуха на входе в компрессор, тем меньше затраты на сжатие. Поэтому для предварительного охлаждения воздуха следует использовать высокоэффективные тепловые насосы и аккумуляторы холода. Тем самым область аккумулирования энергии будет расширена. Предварительно охлажденный воздух перед компрессором уже сам служит своеобразным аккумулятором энергии. Далее воздух сжимается компрессором и его температура достигает температуры окружающей среды.

Здесь следует подчеркнуть, что затраты на сжатие предварительно охлажденного воздуха значительно ниже, соответственно, меньше и потери давления в промежуточном охладителе.

Кроме этого, в процессе охлаждения воздуха будет происходить конденсация влаги, содержащейся в атмосферном воздухе. Таким образом формируется дополнительный положительный эффект в виде получаемой дистиллированной воды. Сжатый воздух хранится в специальных резервуарах при температуре окружающей среды, что исключает какие-либо потери в процессе его хранения. Перед разрядкой

пневматического аккумулятора воздух целесообразно дополнительно подогреть, например, используя теплоту выхлопных газов дизельной электростанции, либо энергию солнца.

Такой дополнительный подогрев воздуха до температуры 200-300 °С позволит получить на выходе из пневматического аккумулятора в 1,2...2,0 раза больше электрической энергии, чем было затрачено на его сжатие. Тем самым коэффициент полезного действия пневматического аккумулятора составит 150-200 %.

Одновременно с этим можно утилизировать потери дизельной электростанции и довести ее коэффициент полезного действия до 80-90 %. Еще один недостаток использования сжатого воздуха при аккумулировании энергии заключается в падении давления при разрядке пневматического аккумулятора. В фиксированном объеме резервуара сжатого воздуха по мере его расходования давление будет неизбежно падать. Для поддержания постоянного давления необходимо, чтобы объем резервуара уменьшался, пропорционально расходу воздуха.

Этого можно добиться двумя способами: хранить воздух под водой в мягком резервуаре (рис. 9), либо использовать водяной компенсатор объема (рис. 10).

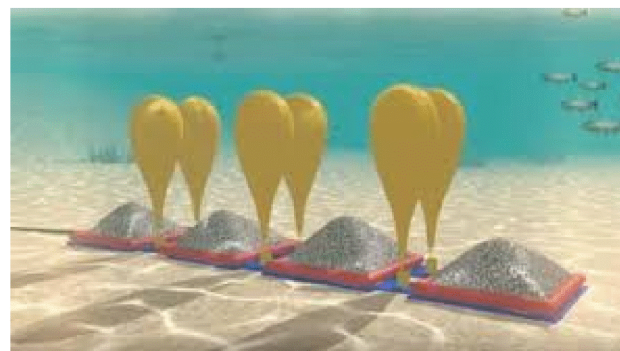


Рис. 9. Хранение сжатого воздуха под водой в мягком резервуаре.

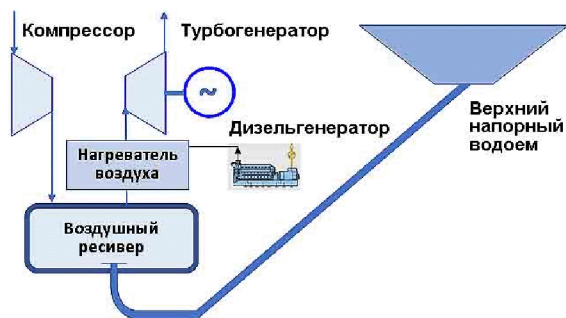


Рис. 10. Схема гибридной аккумулирующей электростанции.

В том и другом случае объем резервуара будет изменяться пропорционально расходу воздуха, а его давление на выходе из пневматического аккумулятора будет постоянным и соответствовать давлению столба воды.

Например, для условий гибридной электростанции на острове El Hierro гидравлический напор воды может быть использован для поддержания постоянного давления сжатого воздуха в пневматическом аккумуляторе (рис. 10), за счет чего расход воды из верхнего водохранилища может быть снижен в несколько раз [11]. Одновременно снизятся гидравлические потери в трубопроводе.

Такой гибридный пневмогидравлический аккумулятор позволит увеличить емкость хранения энергии без увеличения объемов нижнего и верхнего водоемов.

В последнее время разработано большое количество различных схем гибридных электростанций, которые соединяют в себе традиционные и альтернативные источники энергии. В качестве примера можно привести солнечные электростанции, которые имеют дополнительно резервные дизельгенераторы (рис. 11) [12].

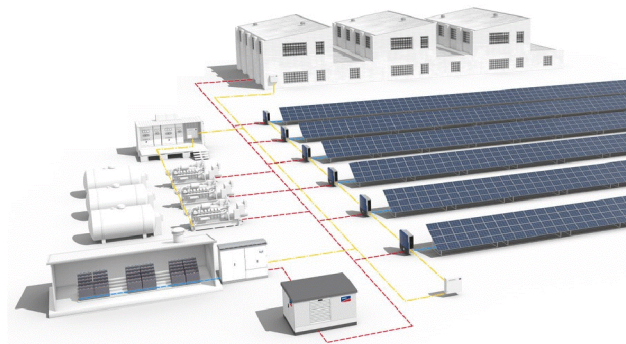


Рис. 11. Схема гибридной солнечной электростанции с резервными дизельгенераторами.

Еще более перспективным, с точки зрения повышения эффективности проектом является

гибридная электростанция, которая включает ветрогенератор, солнечные фотоэлектрические панели и резервные дизельгенераторы (рис. 12) [13, 14].

Оба эти проекта (рис. 11, 12) имеют в своем составе электрические аккумуляторные батареи для накопления и хранения избыточной электрической энергии. Основным их недостатком является то, что все элементы этих гибридных электростанций работают независимо друг от друга.



Рис. 12. Гибридная электростанция с ветрогенератором, солнечными фотоэлектрическими панелями и резервными дизельгенераторами.

Ветрогенераторы и солнечные фотоэлектрические панели, как правило, вырабатывают избыточную электроэнергию в моменты пика солнечной энергии или сильного ветра. Эта электроэнергия накапливается в аккумуляторах. При недостатке электрической энергии включаются дизельгенераторы, которые имеют избыток тепловой энергии.

Если же применить для аккумулирования избыточной электроэнергии технологию получения сжатого воздуха, то избыток тепловой энергии можно использовать для дополнительного подогрева сжатого воздуха. Тем самым эффективность гибридной электростанции будет существенно повышена.

Заключение

Особенность гибридных электростанций, которые объединяют в себе различные технологии получения электрической энергии, заключается в возможности использования преимуществ каждой из них в зависимости от конкретных условий эксплуатации. Тем самым может быть достигнуто существенное сокращение потребления ископаемых видов топлива и сниже-

ние объемов выбросов в атмосферу углекислого газа.

Применение в составе гибридных электростанций аккумулирующих устройств позволяет максимально использовать преимущества альтернативных источников энергии. Однако различные технологии хранения энергии имеют как свои преимущества, так и недостатки, поэтому при выборе соответствующей технологии необходимо учитывать весь спектр условий их применения и возможного достижения максимальной эффективности.

Наиболее перспективными технологиями хранения энергии являются гидроаккумуляция и пневмоаккумуляция. Применение метода производства, хранения и использования сжатого воздуха позволяет реализовать в гибридных электростанциях технологию когенерации, что обеспечивает существенное повышение их эффективности.

Количественная оценка и оптимизация параметров сжатого воздуха при разработке конкретных технологий пневмоаккумуляции для гибридных электростанций требуют дополнительных исследований, которые будут выполнены в ближайшее время.

Обозначения аккумуляторов энергии

CAES (Compressed Air Energy Storage) – аккумулятор энергии на основе сжатого воздуха;

Capacitor – конденсатор;

Flywheel – аккумуляция энергии с помощью маховика;

Lead-acid – свинцово-кислотный аккумулятор;

Li-ion – литий-ионный аккумулятор;

NaS (Sodium-sulfur) – серно-натриевый аккумулятор;

PHS (Pumped Hydroelectric Storage) – гидроаккумулирующая электростанция;

SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) – сверхпроводящий индуктивный аккумулятор;

Supercapacitor – суперконденсатор;

TES (Thermal Energy Storage) – аккумулятор тепловой энергии;

VRB (Vanadium Redox Flow Battery) – ванадиевый окислительно-восстановительный аккумулятор;

ZnBr (Zinc-Bromine) – цинк-бромный аккумулятор.

Список литературы

1. Buitrago, J., Asfour, S. Short-Term Forecasting of Electric Loads Using Nonlinear Autoregressive Artificial Neural Networks with Exogenous Vector

- Inputs / J. Buitrago, S. Asfour // *Energies*, MDPI, Open Access Journal, January, 2017. – Vol. 10(1). – Pp. 1–24.
2. Price, H. The Future of CSP: Dispatchable Solar Power [Электронный ресурс] – Solar Dynamics LLC. – 2018. Режим доступа: https://www.ises.org/sites/default/files/webinars/Webinar_2018_01_Price.pdf
3. Xing, L. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation / X. Luo, J. Wang, M. Dooner, J. Clarke // *Applied Energy*, 2015. – Vol. 137. – Pp. 511–536.
4. Proyecto La Gorona del Viento. Central Hidroeléctrica del Hierro [Электронный ресурс] Pagina web de la empresa la Gorona del Viento S.L. – 2016. Режим доступа: <http://www.goronadelviento.es/index.php?accion=articulo&IdArticulo=70&IdSeccion=85>
5. Ramon Poca. La isla de El Hierro ni es autosuficiente ni 100 % removable [Электронный ресурс] – 2014. Режим доступа: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-isla-de-el-hierro-ni-es-autosuficiente-ni-100-renovable/>
6. VTT Webinars – Technology insights with an impact. Strategic insights on electrical and mechanical energy storage [Электронный ресурс] VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. – 2017. Режим доступа: http://www.vttresearch.com/Documents/events/VTT_Webinar_NOV22_2017_Electrical_Mechanical_Energy_Storage_FINAL_PRESENTATION.pdf
7. Electrical Energy Storage Technology Options: A white paper primer on applications, costs, and options. Technical Report. EPRI, Palo Alto, California, 2010. – 170 p.
8. Arabkoohsara, A., Dremark-Larsenb, M., Lorentzenb, R., Andresen, G.B. Subcooled compressed air energy storage system for coproduction of heat, cooling and electricity / A. Arabkoohsara, M. Dremark-Larsenb, R. Lorentzenb, G.B. Andresen // *Applied Energy*, 2017. – Vol. 205. – Pp. 602–614.
9. Xing, L. at al. Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale Adiabatic Compressed Air Energy Storage systems with low-temperature thermal storage / L. Xing at al. // *Applied Energy*, 2016. – Vol. 162. – Pp. 589–600.
10. Динь, Тьен Зунг. Влияние впрыска воды в компрессор на характеристики газотурбинных энергетических установок: автореф. дис... канд. техн. наук / Тьен Зунг Динь. – М.: МАИ, 2013. – 23 с.
11. LightSail Energy. Regenerative Air Energy Storage [Электронный ресурс] – LightSail Energy. – 2012. Режим доступа: <http://wattnow.org/1842/lightsail-energy-regenerative-air-energy-storage>
12. Новых, А.В. Аккумуляция энергии / А.В. Новых, И.И. Свириденко // Сб. тез. докл. 13-й Межд. научн.-практ. конф. по атомной энергетике: Безопасность, эффективность, ресурс. –

Севастополь, Оргкомитет МНПК АЭ, 2017. – С. 132–135.

13. Автономные гибридные энергоустановки [Электронный ресурс] – 2017. Режим доступа: <http://renen.ru/autonomous-hybrid-power-plants-how-and-why-does-it-work/>
14. Robin Whitlock. Gamesa finalises development of its offgrid system with a new battery storage system [Электронный ресурс] – Renewable Energy Magazine. – 2016. Режим доступа: https://www.renewableenergymagazine.com/energy_saving/gamesa-finalises-development-of-its-offgrid-system-20161109

References

1. Buitrago, J., Asfour, S. Short-Term Forecasting of Electric Loads Using Nonlinear Autoregressive Artificial Neural Networks with Exogenous Vector Inputs, *Energies*, MDPI, *Open Access Journal*, 2017, January, vol. 10(1), pp. 1-24,.
2. Price, H. The Future of CSP: Dispatchable Solar Power. Available at: https://www.ises.org/sites/default/files/webinars/Webinar_2018_01_Price.pdf
3. Xing Luo, Jihong Wang, Mark Dooner, Jonathan Clarke. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015. Vol. 137. Pp. 511–536.
4. Proyecto La Gorona del Viento. Central Hidroeléctrica del Hierro. Pagina web de la empresa la Gorona del Viento S.L. Available at: <http://www.goronadel-viento.es/index.php?accion=articulo&IdArticulo=70&IdSeccion=85>
5. Ramon Poca. La isla de El Hierro ni es autosuficiente ni 100 % removable available at: <https://elperiodicodelaenergia.com/la-isla-de-el-hierro-ni-es-autosuficiente-ni-100-renovable/>
6. VTT Webinars – Technology insights with an impact. Strategic insights on electrical and mechanical energy storage. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd. Available at: http://www.vttresearch.com/Documents/events/VTT_Webinar_NOV22_2017_Electrical_Mechanical_Energy_Storage_FINAL_PRESENTATION.pdf
7. Electrical Energy Storage Technology Options: A white paper primer on applications, costs, and options. Technical Report, EPRI, Palo Alto, California, 2010, 170 p.
8. Arabkoohsara, A., Dremark-Larsenb, M., Lorentzenb, R., Andresen, G.B. Subcooled compressed air energy storage system for coproduction of heat, cooling and electricity. *Applied Energy*, 2017, Vol. 205, Pp. 602–614.
9. Xing, L. et al. Modelling study, efficiency analysis and optimisation of large-scale Adiabatic Compressed Air Energy Storage systems with low-temperature thermal storage. *Applied Energy*, 2016,

Vol. 162, Pp. 589–600.

10. Din', T'en Zung. Vliyanie vpryska vody v kompressor na harakteristiki gazoturbinyh jenergeticheskikh ustanovok: avtoref. dis... kand. tehnic. nauk [Influence of water injection in the compressor on the characteristics of gas turbine power plants]. MAI, 2013, 23 p.
11. LightSail Energy. Regenerative Air Energy Storage. LightSail Energy. Available at: <http://wattnow.org/1842/lightsail-energy-regenerative-air-energy-storage>
12. Novykh, A.V. Sviridenko, I.I. Accumulation of energy. *Sbornik tezisev dokladov 13-j Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii po atomnoj jenergetike: Bezopasnost', jeffektivnost', resursy*. Sevastopol, ICNPE-2017, 2017. Pp. 132–135.
13. Avtonomnye gibridnye jenergoustanki [Autonomous hybrid power plants] Available at: <http://renen.ru/autonomous-hybrid-power-plants-how-and-why-does-it-work/>
14. Robin Whitlock. Gamesa finalises development of its offgrid system with a new battery storage system. Renewable Energy Magazine. Available at: https://www.renewableenergymagazine.com/energy_saving/gamesa-finalises-development-of-its-offgrid-system-20161109

УДК621.3.012.7

Анализ способов выравнивания суточных графиков нагрузки

О.Н. Титаренко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, plotnykova198608@mail.ru .

Статья поступила 10.09.2018 г.; после доработки 12.09.2018 г.

Аннотация

В статье рассмотрены основные способы и средства регулирования режимов электропотребления с точки зрения снижения суточных максимумов и выравнивания графиков нагрузки для достижения более эффективной работы электроэнергетической системы в целом.

Ключевые слова: электроэнергетика, электрическая нагрузка, графики нагрузки, регулирование режимов электропотребления.

Analysis of methods of smoothing of the daily allowance load-graphs

O.N. Titarenko

Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University» Kurchatova Street, 7, Sevastopol, 299015, Russia, plotnykova198608@mail.ru.

The article was received on 10.09.2018 y.; after improvement 12.09.2018 y.

Annotation

In the article basic methods and facilities of adjusting of the modes of electro-consumption are considered from the point of view of decline of daily allowance maximums and smoothing of the load-graphs for the achievement of more effective work of the electroenergy system on the whole.

Keywords: electroenergy, electric loading, load-graphs, adjusting of the modes of electro-consumption.

Введение

Электроэнергетический комплекс России состоит из около 600 электростанций единичной мощностью свыше 5 МВт. Общая установленная мощность электростанций России составляет 250 ГВт, коэффициент использования мощности составляет 55%.

В процессе функционирования энергетической системы электрическая нагрузка отдельных потребителей электроэнергии, а также суммарная нагрузка группы потребителей, которая определяет режим работы электростанций в энергосистеме, постоянно изменяется. Это изменение отражается графиком нагрузки, ко-

торый представляет собой зависимость величины мощности или тока от времени.

Графики нагрузок, как отдельного предприятия, так и энергосистемы в целом имеют неравномерный характер. Конфигурация суточных графиков энергосистемы определяется в основном особенностями графиков нагрузки различных потребителей и их долями в суммарной нагрузке.

Очень важным элементом функционирования и развития электроэнергетической отрасли есть вопрос, связанный с выравниванием графиков нагрузки и регулированием режимов электропотребления. Мероприятия, направленные на снижение неравномерности суточных

графиков нагрузки, позволяют уменьшить себестоимость вырабатываемой электроэнергии.

Постановка цели научной работы

Задачей исследования являются способы выравнивания суточных графиков нагрузки. Необходимо определить наиболее эффективные направления регулирования электрических нагрузок на промышленных предприятиях и энергосистемы в целом.

Технико-экономические показатели, определяемые из графиков нагрузки

Используя графики нагрузок можно определить многие электрические параметры, с помощью которых можно более рационально выполнить систему электроснабжения, правильно выбрав отдельные элементы системы электроснабжения и оборудование подстанций [1]. Графики электрических нагрузок также можно использовать для анализа работы электроустановок при проектировании системы электроснабжения, для составления балансов и прогнозов электропотребления, планирования ремонтов оборудования и т.д.

По графику нагрузки можно определить технико-экономические показатели, а также потери электроэнергии, на основании которых можно сделать вывод об эффективности работы энергетической системы и определить пути энергосбережения.

Суточные графики нагрузки отражают изменение активной мощности потребителей в течение суток и имеют, как правило, неравномерный характер в виде утренних и вечерних пиков и ночных провалов.

На рис. 1 представлен суточный график активной мощности.

Поэтому существует необходимость выравнивания суточных графиков, несмотря на то, что наличие провала электрической нагрузки энергосистемы в летний период создает благоприятные условия для ремонта оборудования.

Площадь, ограниченная суточным графиком, определяет количество электроэнергии (кВтч), выработанной или потребляемой отдельной электроустановкой за сутки [3]:

$$W_{\Pi} = \sum P_i T_i,$$

где P_i – мощность i -й ступени графика; T_i – продолжительность ступени. Средняя суточная мощность нагрузки $P_{ср.сут.}$ определяется на основании сведений о количестве электро-

энергии W (кВтч), выработанной или потребленной за сутки:

$$P_{ср.сут.} = \frac{W}{t} = \frac{W}{24}$$

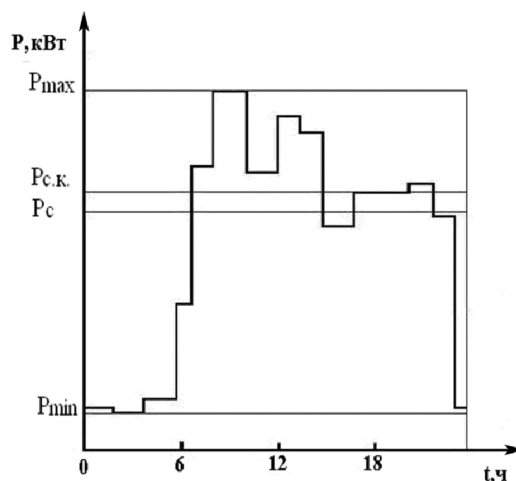


Рис. 1. Суточный график активной мощности
 $P_{\max}$ – максимальная мощность; $P_{\min}$ – минимальная мощность;
 P_c – средняя мощность; $P_{с.к.}$ – средняя квадратичная мощность

Годовой график нагрузки по продолжительности определяет длительность работы электроустановки в течение года при различных нагрузках.

Средняя годовая мощность нагрузки определяется из выражения:

$$P_{ср.год.} = \frac{W}{T} = \frac{W}{8760}$$

Можно считать, что график нагрузки энергосистемы в большей степени отражает или повторяет график нагрузки коммунально-бытовых потребителей.

Степень неравномерности графика работы установки оценивают следующими коэффициентами:

- коэффициентом неравномерности:

$$K_{нер} = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$$

- коэффициентом заполнения:

$$K_{зп} = \frac{W_{\Pi}}{P_{\max} T} = \frac{P_{ср}}{P_{\max}}$$

- коэффициентом одновременности нагрузки (коэффициентом спроса):

$$K_c = \frac{P_{\max}}{\sum P_{\text{ном}}}$$

Коэффициент неравномерности определяется отношением минимальной и максимальной нагрузок.

Коэффициент заполнения графика нагрузки характеризует отношение реально выработанного или потребленного количества электроэнергии за определенный период (сутки, квартал, год) к такому количеству энергии, которое могло бы быть выработано или использовано за тот же период времени, при условии, что нагрузка установки все время была максимальной [2].

Коэффициент спроса равен отношению совмещенной максимальной потребляемой мощности предприятия к сумме нагрузок его отдельных электроприемников.

Вышеуказанные коэффициенты характеризуют степень использования энергии в зависимости от времени. На основании анализа этих показателей можно определять эффективность различных способов выравнивания графиков нагрузок.

Очевидно, что чем равномернее график, тем ближе значение всех этих коэффициентов к единице.

Способы регулирования электрических нагрузок на промышленных предприятиях

Регулирование электрических нагрузок предполагает применение комплекса целенаправленных мероприятий по сокращению расхода электроэнергии и по выравниванию графиков нагрузки.

В результате определенных мероприятий значительно уменьшаются потери электроэнергии в системе электроснабжения, что дает возможность при выборе элементов этой системы уменьшить её стоимость.

Каждая отрасль промышленности имеет свой характерный график нагрузки, который определяется особенностями технологических процессов данной отрасли и характером работы предприятий.

Неравномерный график нагрузки характерен для одно- и двухсменных предприятий, а также для отдельных энергоёмких приёмников электрической энергии, таких как электропечи, прокатные станы, электролизные установки. Предприятия машиностроительной, автомобильной, станкостроительной, и электротехни-

ческой отраслей обладают невысоким коэффициентом заполнения графика нагрузки, находящимся в пределах 0,67-0,75 [2].

Неравномерность графика нагрузки способствует ухудшению режима работы электрических сетей, что влечет за собой дополнительные капитальные затраты на сооружение новых сетей и агрегатов электростанций, обеспечивающих покрытие пиковых нагрузок.

Необходимо стремиться к получению равномерного графика, для повышения коэффициента использования оборудования и снижения потерь электроэнергии. Уменьшение величины суммарного максимума нагрузки дает возможность при неизменной установленной мощности трансформатора обеспечить электроснабжение большего числа потребителей. Уменьшения общего суммарного максимума и выравнивание графика нагрузки можно достичь за счет смещения времени начала работы предприятий и обеденных перерывов отдельных цехов, а также внедрением следующих мероприятий:

- 1) применение мер по обеспечению согласованной работы технологического оборудования в течение смены для уменьшения колебаний суммарной электрической нагрузки;
- 2) использование многосменной работы для обеспечения равномерного использования оборудования в течение суток;
- 3) смещение начала и конца работы, а также обеденных перерывов цехов и участков между собой в случае одно- и двухсменной работы;
- 4) покрытие суточных пиковых нагрузок местными источниками электроэнергии (за счёт дополнительной генерации);
- 5) перераспределение в течение суток отдельных энергоемких процессов.

Одним из эффективных факторов, способствующих выравниванию графика нагрузки, является оплата за электроэнергию с использованием двухставочного тарифа.

Одноставочный тариф используется для различных групп потребителей со ставкой за каждый 1 кВт-час фактически потребленной активной энергии за расчетный период. Этот вид тарифа не зависит от графика нагрузки энергосистемы.

Этот недостаток можно устранить, используя двухставочный тариф на электроэнергию. Двухставочный тариф состоит из основной ставки за каждый кВт договорной величины заявленной активной мощности, потребляемой в часы максимальных нагрузок энер-

госистемы, и дополнительной ставки за каждый кВт·час активной энергии, фактически учтенной приборами учета. Оплата по двухставочному тарифу предполагает стимулирование потребителей энергии к снижению нагрузки, участвующей в максимуме энергосистемы, и по возможности переносе ее на другие часы суток.

При расчете по двухставочному тарифу появляется возможность максимального использования установленной мощности и выравнивания графиков нагрузки.

Для потребителей электроэнергии важным аспектом в плане регулирования нагрузок является снижение платы за электроэнергию или мощность. Поэтому взаимоотношения между предприятиями и энергокомпаниями строятся, основываясь на проведении стимулирующих регулировочных мероприятий, связанных с регулированием энергопотребления и выравниванием графика нагрузки. Для этой цели потребителями могут применяться двухставочные тарифы с отдельной платой пиковой мощности и энергии, а также другие модификации тарифов на электроэнергию со ставками, дифференцированными по зонам суток (пиковая, полупиковая, ночная). Потребитель сам выбирает наиболее рациональный, экономически обоснованный тариф, согласующийся с техническими возможностями применяемых регулировочных мероприятий. Выбор способов регулирования и методов его стимулирования ориентируется на региональные условия и специфику организации энергетического рынка.

Существует ряд электроприемников, работу которых можно перевести, например, на ночное время. Они называются электроприемниками-регуляторами. В качестве электроприемников-регуляторов можно использовать мощные электротехнические производственные или вспомогательные устройства, которые имеют относительно равномерную нагрузку в течение нескольких часов при небольшой численности или отсутствии обслуживающего персонала.

К таким электроприемникам можно отнести:

- сталеплавильные или другие электрические печи машиностроительных предприятий;
- теплоаккумулирующие устройства электрического отопления;
- водонагревательные устройства с большим запасом воды;
- зарядные агрегаты аккумуляторных электровозов, электрокаров и электромобилей.

Если вышеуказанные способы и методы снижения мощности в пиковое время не приводят к ожидаемым результатам при значительном дефиците мощности в энергосистеме используют по возможности местные пиковые электростанции или генераторные агрегаты предприятий.

Для регулирования энергопотребления с помощью выравнивания графика нагрузки потребителя очень важным является рациональный режим работы энергоёмкого электрооборудования, например, электротермических установок, сушильных, холодильных камер и др. Для максимальной экономии электроэнергии для таких электроприемников должен быть выбран наиболее экономичный режим – это режим полного отключения с дополнительными расходами на запуск или работа с дополнительными потерями на холостом ходе.

Выравнивание графика нагрузки энергосистемы

Основные способы регулирования режимов электропотребления должны быть направлены на снижение суточных максимумов и выравнивание графиков нагрузки путем заполнения ночного минимума посредством переноса части нагрузок на вне пиковые часы суток. Это приводит к повышению коэффициента нагрузки, увеличению числа часов использования максимума, снижению коэффициента разновременности нагрузки. Вследствие выравнивания графиков нагрузки энергосистемы снижается потребность в генерирующих мощностях и уменьшаются затраты производства за счет более рационального использования оборудования по мощности и по времени. Уплотнение графиков нагрузки может осуществляться путем внедрения государственных мер, внутриотраслевых мероприятий, а также регулированием энергопотребления непосредственно на предприятиях. Использование рациональных режимов электропотребления с целью выравнивания графика нагрузки может производиться потребителями самостоятельно и во взаимодействии с энергокомпанией. Электроприемники промышленных и приравненных к ним предприятий в значительной степени определяют практическое регулирование суточного графика нагрузки и снижение пиков в часы максимума энергосистемы. К ним также могут присоединяться другие группы потребителей.

Регулирование режимов электропотребления промышленных предприятий ведет к вы-

равнинанию графика нагрузки энергосистемы и снижению общесистемного максимума. В результате этих мероприятий энергокомпания в значительной степени может сократить свои текущие и капитальные затраты, рационализировать баланс генерирующих мощностей, и, в итоге повысить конкурентоспособность компании на рынке электроэнергии.

График нагрузки энергосистемы состоит из множества графиков нагрузки отдельных потребителей, поэтому выравнивание графика связано с применением потребителей-регуляторов. Использование таких потребителей дает возможность ограничивать или переносить часть своей электрической нагрузки с одних часов суток на другие (при суточном регулировании) или с рабочих дней на выходные (при недельном регулировании). В качестве потребителя-регулятора можно использовать любой потребитель электроэнергии, учитывая возможности каждого индивидуальные возможности каждого из них.

С точки зрения энергосистемы потребители-регуляторы можно условно разделить на две группы: группу потребителей-регуляторов, которые являются частью энергосистемы и реализуют совмещенную функцию производства/потребления электроэнергии, и более широкую группу потребителей-регуляторов, которая находится вне энергосистемы и использует электроэнергию в собственных целях.

К первой группе относятся, прежде всего, аккумулирующие электростанции. Их преимущество состоит в потреблении электроэнергии в часы минимальной нагрузки энергосистемы. В результате можно достичь уменьшения ночного минимума, определенным образом выровнять график нагрузки и исключить необходимость разгрузки или остановки крупных блоков тепловых электростанций (ТЭС) и атомных электростанций (АЭС) в ночные часы и выходные дни. Также достоинством таких станций является их высокая маневренность генерации в часы максимальной нагрузки энергосистемы за счет ранее аккумулированного энергоресурса. Все агрегаты аккумулирующих электростанций работают при нормальных температурных условиях и более низких давлениях, чем тепловые электростанции, поэтому аккумулирующие станции дешевле, надежнее и долговечнее, чем ТЭС.

Наиболее широкое применение получили гидроаккумулирующие электростанции. ГАЭС обладают двойным регулирующим эффектом, в отличие от гидро- и тепловых электростанций. Одна и та же установленная мощность в режиме ге-

нерации и в насосном режим в одном случае используется для подъема ночного провала суточного графика нагрузки (при работе в режиме зарядки станции), а в другом – для покрытия пиков (в режиме разрядки). Поэтому использование гидроаккумулирующих электростанций является наиболее эффективным способом выравнивания суточного графика нагрузки в энергосистемах, где наблюдается преобладание крупных генерирующих мощностей ТЭС и АЭС. Их КПД составляет 72-75 %, а для зарядки станций используется ночная электроэнергия, которая, как правило, в 3-6 раз дешевле пиковой. Особенно выгодно использовать для зарядки ГАЭС дешевую ночную электроэнергию соседних государств, если таковая имеется. На рис. 2 представлен типичный график нагрузки энергосистемы.

В случае отсутствия в энергосистеме маневренных генерирующих мощностей, для регулирования энергопотребления применяется режимное взаимодействие энергосистемы с потребителями, включая административные и экономические меры.

Административные меры предполагают принудительное ограничение нагрузки потребителей в определенные часы суток и дни недели.

Применение таких мер сопровождается прямым и косвенным ущербом для потребителя и государства в целом. Однако, такой способ выравнивания графика нагрузки для энергосистемы дает временный эффект. Следует заметить, что потребитель выбирает для себя только тот способ регулирования энергоиспользования, при котором плата энергосистеме за потребленную электроэнергию будет меньше, чем до выполнения регулировочных мероприятий.

Важным способом регулирования энергопотребления является использование современных информационно-измерительных систем учета электроэнергии, что также способствует выравниванию графика нагрузки энергосистемы.

Наибольшего эффекта можно добиться, применяя такие автоматизированные системы учета электроэнергии как в энергосистеме, так и у потребителей. Их цифровые показания должны стать основой для расчетов между сторонами за отпущенную/потребленную электроэнергию.

Дополнительным эффективным решением в государстве для выравнивания графика нагрузки является создание непрерывных автоматических производств, способных изначально равномерно потреблять электроэнергию.

Еще одним способом выравнивания графика нагрузки является использование устройств, способных аккумулировать энергию в ночное время и в выходные дни с возможностью передачи ее в сеть или непосредственно потребителю во время пиковых нагрузок системы [3]. Процесс аккумулирования энергии может быть централизованным на стороне генерации (например, строительство крупной гидроаккумулирующей электростанции вблизи теплоэлектростанций, атомных электростанций и пр.). Такой способ выравнивания графика используется на Загорской ГАЭС, которая покрывает суточные пиковые нагрузки в Осковской и Центральной энергосистемах, а также на Ставропольской ГАЭС.

Перспективным также является способ децентрализованной аккумуляции электроэнергии, предусматривающий установку аккумуляторов непосредственно у потребителя (например, на крыше или в подвале многоэтажного дома).

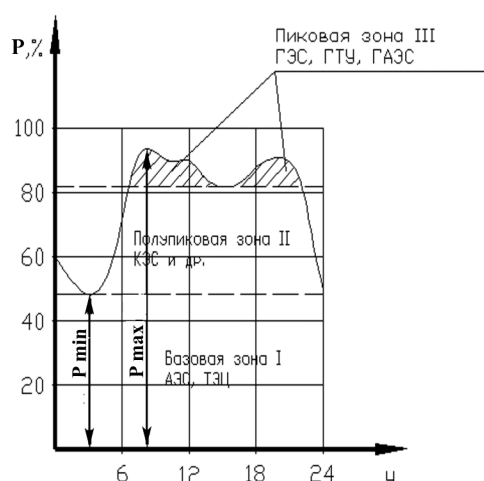


Рис. 2. Типичный график нагрузки энергосистемы АЭС – атомные электростанции;

ТЭЦ- тепловые электростанции, вырабатывающие электрическую и тепловую энергию ;

КЭС - тепловые электростанции, вырабатывающие только электрическую электроэнергию - конденсационные;

ГТУ - электростанции с газовыми турбинами (газотурбинные);

ТЭС - электростанции с парогазовыми турбинами (парогазовые);

ГЭС – гидроэлектростанции;

ГАЭС - гидроаккумулирующие электростанции.

Однако этот вариант в настоящее время подлежит тщательному анализу и экономическому обоснованию. Пока такие устройства используются

только в экспериментальных вариантах, так как аккумуляторы имеют большие габариты и вес, а также стоимость.

В данный период в Германии и в России проводятся работы по исследованию и внедрению устройств аккумулирования электроэнергии. Чтобы получить эффект от выравнивания графика нагрузки указанным способом, необходимо дополнительно стимулировать потребителей, устанавливающих у себя такие устройства.

Вывод

Одной из особенностей работы энергосистемы является неравномерность энергопотребления. Поэтому основным элементом эффективного использования энергоресурсов в энергосистеме России есть необходимость выравнивания графика нагрузки.

Основные способы выравнивания графиков нагрузки следующие:

- создание энергосистем большой протяженности, объединяющих генерирующие предприятия и потребителей с Запада на Восток, т.е. многие часовые пояса;
- модернизация базисных блоков для повышения их маневренности;
- замена устаревшего оборудования тепловых электростанций на газотурбинные;
- повышение числа рабочих смен потребителей;
- сезонный сдвиг времени в зависимости от светлого времени суток;
- введение экономических мер в оплату электроэнергии;
- использование аккумулирующих станций.

С точки зрения энергосистемы этот процесс производится с помощью электростанций. Атомные и тепловые электростанции работают в базовом режиме. Поэтому для создания маневренных мощностей используются гидро- и гидроаккумулирующие электростанции, газотурбинные установки, конденсационные электростанции.

Одним из вариантов выравнивания графика есть использование потребителей-регуляторов. С помощью этих потребителей возможно ограничение и перенос части своей электрической нагрузки с одних часов суток на другие (суточное регулирование) или с рабочих дней на выходные (недельное регулирование). В качестве регулятора может быть любой потребитель электроэнергии.

Также регулировать нагрузку можно с помощью применения многотарифных приборов учета электроэнергии и современных информа-

ционных систем учета и контроля электроэнергии.

Современные информационные измерительные приборы и средства учета электроэнергии можно эффективно использовать как на предприятиях, так и в коммунально-бытовом секторе.

Как один из частных способов выравнивания графика нагрузки энергопотребления может быть использование зарядных устройств электротранспорта.

Список литературы

1. Кудрин Б.И. Электроснабжение промышленных предприятий. Учебник для вузов. – М.: Интермет Инжиниринг, 2015.
2. Приемники и потребители электрической энергии систем электроснабжения: учебное пособие / Т.Е. Карманова. – Архангельск: САФУ имени М.В. Ломоносова, 2015.
3. Кудрин Б.И., Жилин Б.В. Электроснабжение потребителей и режимы Учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013.
4. Джангиров В.А. Интеграция энергообъединений на Евразийском континенте/ Вести в электроэнергетике. – 2013. -№4.

References

1. Kudrin B.I. Power supply of industrial enterprises. Textbook for high schools. - Moscow: Internet Engineering, 2015.
2. Receivers and consumers of electricity of power supply systems: a textbook / T.E. Karmanov. - Arkhangelsk: SAFU after M.V. Lomonosov Moscow State University, 2015. - 120 p.
3. Kudrin BI, Zhilin BV Power supply of consumers and modes. Textbook for high schools. - M.: Publishing house MEI, 2013.
4. Dzhangirov V.A. Integration of energy associations on the Eurasian continent / News in the electric power industry. - 2013.-№4.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 349.6

Требования к разделу проектной документации «Перечень мероприятий по охране окружающей среды» с учетом изменений в законодательстве и опыта государственных экспертиз

Н.А. Мороз¹, Е.В. Лунева², С.А. Чупрынин³, Т.Н. Замыслова⁴, А.С. Мирошниченко⁵

^{1,3,4,5} АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных станций»,
ул. Ферганская, 25, г. Москва, 109507, Россия

² Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» по реализации капитальных проектов,
Проектируемый проезд №4062, д. 6, стр. 5, помещение 3.5, г. Москва, 115432, Россия

¹sv_nata@mail.ru, ²Luneva100@yandex.ru, ³chuprynin.sevas@mail.ru, ⁴zamytanya@yandex.ru, ⁵m_a_s@bk.ru

Статья поступила 07.09.2018 г.; после доработки 12.09.2018 г.

Аннотация

При разработке норм раздела «перечень мероприятий по охране окружающей среды» в проектной документации дается анализ действующих законов и нормативных правовых актов в области охраны окружающей среды. Определены и систематизированы основные требования к структуре и содержанию раздела «перечень мероприятий по охране окружающей среды», скорректирована терминология к возникающим и разрабатываемым документам ГК «Росатом».

Ключевые слова: охрана окружающей среды, проектная документация, нормативная база.

Requirements to the project documentation section «Measures list for environmental protection» taking into account changes in legislation and state examinations experience

N.A. Moroz¹, E.V. Luneva², S.A. Chuprinin³, T.N. Zamislova⁴, A.S. Miroshnichenko⁵

^{1,3,4,5} JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation»,
25 Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia

² Branch office of joint-stock company «Concern Rosenergoatom» for realization of fundamental projects,
Proektiruemyy proezd №4062, h. 6, b. 5, office 3.5, Moscow, 115432, Russia

¹sv_nata@mail.ru, ²Luneva100@yandex.ru, ³chuprynin.sevas@mail.ru, ⁴zamytanya@yandex.ru, ⁵m_a_s@bk.ru

Received 07.09.2018 y.; received in final form 12.09.2018 y.

Abstract

During developing norms for Section «List of Actions for Environmental Protection» in project documentation analysis of present laws and normative legal acts in the field of environmental protection is given. Basic demands for structure and content of section «List of Actions for Environmental Protection» are defined and systemized; terminology was adjusted to occurring and developing documents of GK «Rosatom».

Keywords: environmental protection, project documentation, normative basis.

Введение

В условиях ужесточения природоохранного законодательства, совершенствования норма-

тивного правового регулирования безопасности и стандартизации в области использования атомной энергии и различных мер, направленных на охрану окружающей среды, а также в

условиях общего роста интереса разных общественных групп и организаций к проблемам окружающей среды в рамках общей проблемы устойчивого развития экономики Российской Федерации Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом» (далее – Госкорпорация «Росатом») проявляет все большую заинтересованность в достижении и демонстрации надлежащих экологических характеристик при помощи контроля за воздействием на окружающую среду своей деятельности по безопасному производству электрической и тепловой энергии, оказанию услуг населению страны.

В этой связи одним из направлений деятельности Госкорпорации «Росатом» является совершенствование нормативной базы, в том числе разработка отраслевых стандартов, методических указаний и другой документации, регулирующей работу организаций атомной отрасли в той или иной области.

В полной мере это касается отраслевого стандарта Госкорпорации «Росатом» «Объекты использования атомной энергии. Проектирование. Разработка раздела проектной документации «Перечень мероприятий по охране окружающей среды».

Применение стандарта будет способствовать достижению следующих целей:

- повышение качества проектной документации, что упростит прохождение государственных экспертиз;
- снижение количества отрицательных заключений государственных экспертиз.

Подготовительный этап разработки стандарта включал в себя сбор и изучение материалов по объекту стандартизации, в том числе результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а также анализ требований законодательных и подзаконных актов, действующих нормативных документов, требования которых необходимо учесть при разработке стандарта.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – актуализация и гармонизация требований к составу и содержанию раздела проектной документации «Перечень мероприятий по охране окружающей среды» (далее ПМОС) в контексте изменений законодательных и подзаконных актов, принятых в период с 2008 по 2017 годы, современных требований нормативных документов, а также с учетом опыта государственных экспертиз объектов капитального строительства АЭС.

Для достижения поставленной цели необ-

ходимо выполнить анализ основных положений и требований законодательства, нормативно-методических документов и научных работ.

Анализ законодательных и подзаконных актов, научных работ, действующих нормативных документов, опыта государственных экспертиз, требования которых необходимо учесть при разработке стандарта

Нормативный документ – документ, устанавливающий правила, общие принципы и характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов (ГОСТ 1.1-2002) [1]. Под термином «Нормативные документы» в настоящем отчете будут рассматриваться Федеральные законы (ФЗ), Постановления и распоряжения Правительства РФ, приказы, методические указания (МУ), стандарты отраслевых организаций (СТО).

Законодательство в области охраны окружающей среды основывается на Конституции Российской Федерации и состоит из Федерального закона от 10 января 2002 г. №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» [2], других федеральных законов, а также принимаемых в соответствии с ними иных нормативных правовых актов Российской Федерации, законов и иных нормативных правовых актов субъектов Российской Федерации.

Федеральный закон от 10.01.2002 №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» определяет правовые основы государственной политики в области охраны окружающей среды, обеспечивающие сбалансированное решение социально-экономических задач, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов в целях удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, укрепления правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности.

Настоящий Федеральный закон регулирует отношения в сфере взаимодействия общества и природы, возникающие при осуществлении хозяйственной и иной деятельности, связанной с воздействием на природную среду как важнейшую составляющую окружающей среды, являющуюся основой жизни на Земле, в пределах территории Российской Федерации, а также на континентальном шельфе и в исключительной экономической зоне Российской Федерации.

Статьи 34-36 устанавливают ряд требований к составу задания на проектирование и тех-

нического задания на разработку проектной документации, предусматривающие реализацию в проекте мероприятий по охране окружающей среды.

В связи с внесением изменений Федеральным законом от 21 июля 2014 года №219-ФЗ [3] в [2] при разработке раздела «Термины и определения» стандарта необходимо учесть изменения следующих терминов с соответствующими определениями:

нормативы качества окружающей среды – нормативы, которые установлены в соответствии с физическими, химическими, биологическими и иными показателями для оценки состояния окружающей среды и при соблюдении которых обеспечивается благоприятная окружающая среда;

нормативы допустимого воздействия на окружающую среду – нормативы, которые установлены в соответствии с показателями воздействия хозяйственной и иной деятельности на окружающую среду и при которых соблюдаются нормативы качества окружающей среды;

нормативы допустимой антропогенной нагрузки на окружающую среду – нормативы, которые установлены в соответствии с величиной допустимого совокупного воздействия всех источников на окружающую среду и (или) отдельные компоненты природной среды в пределах конкретных территорий и (или) акваторий и при соблюдении которых обеспечивается устойчивое функционирование естественных экологических систем и сохраняется биологическое разнообразие;

нормативы допустимых выбросов – нормативы выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух, которые определяются как объем или масса химических веществ либо смеси химических веществ, микроорганизмов, иных веществ, как показатели активности радиоактивных веществ, допустимые для выброса в атмосферный воздух стационарными источниками;

нормативы допустимых сбросов – нормативы сбросов загрязняющих веществ в составе сточных вод в водные объекты, которые определяются как объем или масса химических веществ либо смеси химических веществ, микроорганизмов, иных веществ, как показатели активности радиоактивных веществ, допустимые для сброса в водные объекты стационарными источниками;

нормативы предельно допустимых концентраций химических веществ, в том числе

радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов (далее также – нормативы предельно допустимых концентраций) – нормативы, которые установлены в соответствии с показателями предельно допустимого содержания химических веществ, в том числе радиоактивных, иных веществ и микроорганизмов в окружающей среде и несоблюдение которых может привести к загрязнению окружающей среды, деградации естественных экологических систем;

оценка воздействия на окружающую среду – вид деятельности по выявлению, анализу и учету прямых, косвенных и иных последствий воздействия на окружающую среду планируемой хозяйственной и иной деятельности в целях принятия решения о возможности или невозможности ее осуществления;

государственный экологический мониторинг (государственный мониторинг окружающей среды) – комплексные наблюдения за состоянием окружающей среды, в том числе компонентов природной среды, естественных экологических систем, за происходящими в них процессами, явлениями, оценка и прогноз изменений состояния окружающей среды;

контроль в области охраны окружающей среды (экологический контроль) – система мер, направленная на предотвращение, выявление и пресечение нарушения законодательства в области охраны окружающей среды, обеспечение соблюдения юридическими лицами и индивидуальными предпринимателями требований, в том числе нормативов и нормативных документов, федеральных норм и правил, в области охраны окружающей среды;

требования в области охраны окружающей среды (далее также – природоохранные требования) – предъявляемые к хозяйственной и иной деятельности обязательные условия, ограничения или их совокупность, установленные законами, иными нормативными правовыми актами, нормативами в области охраны окружающей среды, федеральными нормами и правилами в области охраны окружающей среды и иными нормативными документами в области охраны окружающей среды;

вред окружающей среде – негативное изменение окружающей среды в результате ее загрязнения, повлекшее за собой деградацию естественных экологических систем и истощение природных ресурсов;

экологический риск – вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и

иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера;

экологическая безопасность – состояние защищенности природной среды и жизненно важных интересов человека от возможного негативного воздействия хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, их последствий;

объект, оказывающий негативное воздействие на окружающую среду, – объект капитального строительства и (или) другой объект, а также их совокупность, объединенные единым назначением и (или) неразрывно связанные физически или технологически и расположенные в пределах одного или нескольких земельных участков;

стационарный источник загрязнения окружающей среды (далее – *стационарный источник*) – источник загрязнения окружающей среды, местоположение которого определено с применением единой государственной системы координат или который может быть перемещен посредством передвижного источника загрязнения окружающей среды.

При разработке стандарта в подразделе «Результаты оценки воздействия объекта капитального строительства на окружающую среду» необходимо учесть следующие нижеприведенные требования, введенные в действие Федеральным законом от 28 декабря 2013 года № 409-ФЗ [4]:

1. Размещение ядерных установок (в том числе атомных станций), радиационных источников, пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, пунктов хранения, хранилищ радиоактивных отходов осуществляется при наличии по проектам и иным обосновывающим материалам положительных заключений государственной экологической экспертизы и иных государственных экспертиз, предусмотренных законодательством Российской Федерации и подтверждающих экологическую и радиационную безопасность объектов использования атомной энергии в соответствии с законодательством Российской Федерации.

2. Проекты размещения ядерных установок (в том числе атомных станций), радиационных источников, пунктов хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ, пунктов хранения, хранилищ радиоактивных отходов должны содержать решения, обеспечивающие безопасный вывод их из эксплуатации или закрытие пунктов захоронения радиоактивных отходов.

Федеральный закон от 04.05.1999 №96-ФЗ

«Об охране атмосферного воздуха» [5] устанавливает правовые основы охраны атмосферного воздуха и направлен на реализацию конституционных прав граждан на благоприятную окружающую среду и достоверную информацию о ее состоянии.

Статьи 16, 18, 23, 25, 30 учитываются при разработке мероприятий по охране окружающей среды. Статья 25 содержит указание о разработке программы производственного экологического контроля (мониторинга) за характером изменения всех компонентов экосистемы при строительстве и эксплуатации объекта, а также при авариях на основе сведений раздела «предложения к программе экологического мониторинга», входящего в состав технического отчёта по инженерно-экологическим изысканиям для проектной документации для нового строительства.

Положение о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию, утвержденное постановлением Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 №87 [6], устанавливает состав разделов проектной документации и требования к содержанию этих разделов.

Пункт 8 Положения определяет необходимость в процессе подготовки проектной документации выделения этапов строительства. При этом определяется объект (или его часть) или приводится перечень объектов (или их частей), которые в совокупности при вводе их в эксплуатацию могут эксплуатироваться автономно применительно к своему функциональному назначению при соблюдении всех требований энергетического обеспечения, экологической, санитарно-эпидемиологической безопасности, взрывопожаробезопасности, охраны труда и техники безопасности как на сданном в эксплуатацию объекте (-ах) или его (их) частях, так и на объектах (их частях), строительство, реконструкция которых продолжается.

В соответствии с требованиями [6], необходимо при разработке учесть, что основная часть стандарта должна включать следующие разделы:

1. Требования к содержанию подраздела «Результаты оценки воздействия объекта капитального строительства на окружающую среду».

2. Требования к содержанию подраздела «Перечень мероприятий по предотвращению и (или) снижению возможного негативного воздействия намечаемой хозяйственной деятельности на окружающую среду и рациональному

использованию природных ресурсов на период строительства и эксплуатации объекта капитального строительства», в том числе требования к содержанию подразделов:

2.1. Результаты расчетов приземных концентраций загрязняющих веществ, анализ и предложения по допустимым и временно разрешенным выбросам.

2.2. Обоснование решений по очистке сточных вод и утилизации обезвреженных элементов, по предотвращению аварийных сбросов сточных вод;

2.3. Мероприятия по охране атмосферного воздуха.

2.4. Мероприятия по оборотному водоснабжению – для объектов производственного назначения.

2.5. Мероприятия по охране и рациональному использованию земельных ресурсов и почвенного покрова, в том числе мероприятия по рекультивации нарушенных или загрязненных земельных участков и почвенного покрова.

2.6. Мероприятия по сбору, использованию, обезвреживанию, транспортировке и размещению опасных отходов.

2.7. Мероприятия по охране недр – для объектов производственного назначения.

2.8. Мероприятия по охране объектов растительного и животного мира и среды их обитания (при наличии объектов растительного и животного мира, занесенных в Красную книгу Российской Федерации и красные книги субъектов Российской Федерации, отдельно указываются мероприятия по охране таких объектов).

2.9. Мероприятия по минимизации возникновения возможных аварийных ситуаций на объекте капитального строительства и последствий их воздействия на экосистему региона.

2.10. Мероприятия, технические решения и сооружения, обеспечивающие рациональное использование и охрану водных объектов, а также сохранение водных биологических ресурсов (в том числе предотвращение попадания рыб и других водных биологических ресурсов в водозаборные сооружения) и среды их обитания, в том числе условий их размножения, нагула, путей миграции (при необходимости).

2.11. Программа производственного экологического контроля (мониторинга) за характером изменения всех компонентов экосистемы при строительстве и эксплуатации объекта, а также при авариях.

3. Требования к содержанию подраздела «Перечень и расчет затрат на реализацию природоохранных мероприятий и компенсацион-

ных выплат.

4. Приложения.

Согласно [6] для проектируемых объектов в разделе 8 «Перечень мероприятий по охране окружающей среды» в состав текстовой части должны быть включены предложения по допустимым выбросам (ДВ) и временно разрешенным выбросам (ВРВ). Однако данный документ носит рамочный характер и не содержит конкретных требований к составу, содержанию и оформлению предложений по предельно допустимым выбросам, обеспечивающих возможность установления в дальнейшем нормативов ДВ и получение разрешения на выброс загрязняющих веществ в атмосферу на период производства строительных работ и период эксплуатации [7]. Согласно п. 12 «Административного регламента Федеральной службы по надзору в сфере природопользования по предоставлению государственной услуги по установлению предельно допустимых выбросов и временно согласованных выбросов», утвержденного Приказом Минприроды России № 414 от 29.09.2015 [8], для установления нормативов ДВ для вводимых в эксплуатацию новых объектов требуется представление в территориальный орган Росприроднадзора проектной документации, содержащей предложения нормативов ДВ. Результатом предоставления государственной услуги является: выдача Заявителю заверенной копии приказа территориального органа Росприроднадзора об установлении ДВ или предоставление мотивированного отказа в случае выявления неполной, недостоверной или искаженной информации (п. 49).

Опыт государственных экспертиз показывает, что основные несоответствия, выявленные экспертами, встречаются по факту предоставления неполной, недостоверной и /или искаженной информации. Среди основных замечаний:

- отсутствие обоснования предложений нормативов ДВ;
- отсутствие материалов расчетов выбросов ЗВ в атмосферу с обоснованием исходных данных;
- отсутствие ссылок на используемые методики расчета;
- несоответствие исходных данных, принятых в расчетах выбросов;
- непредставление материалов расчета рассеивания в полном объеме;
- занижение максимальных выбросов г/с;
- отсутствие обоснования размеров зон влияния;

- отсутствие оценки воздействия не только на жилой застройке, но и на территориях с повышенными требованиями к качеству атмосферного воздуха [7];
- несоответствие технических решений, заложенных в разделе «Перечень мероприятий по охране окружающей среды», результатам инженерно-экологических изысканий;
- несоответствие содержания раздела «Перечень мероприятий по охране окружающей среды» и описанных технических решений другим разделам проектной документации;
- наличие в проектной документации технологических решений, противоречащих законодательству Российской Федерации в области охраны окружающей среды;
- отсутствие данных по водопотреблению и водоотведению при выполнении строительных работ;
- не представление данных о качественном и количественном составе всех видов сточных вод, в том числе поверхностных, как на период строительства, так и на период эксплуатации объекта;
- не предусматриваются проектные решения по очистке сточных вод, как на период строительства, так и на период эксплуатации объекта;
- сброс сточных вод предполагается в границах водоохранных зон, зон санитарной охраны источников водоснабжения или в нерестовые зоны;
- отсутствие проектных решений по рекультивации;
- отсутствие решений по обращению с отходами и сведений по ним, не учитываются технологические процессы при строительстве и эксплуатации, приводящие к образованию отходов;
- отсутствие сведений о местах конечного размещения образующихся отходов; нередко проектной документацией предусматривается размещение отходов на объектах, не включённых в государственный реестр объектов размещения отходов (ГРОРО) или расположенных в границах населённых пунктов;
- отсутствие разрешения на застройку площадей залегания полезных ископаемых либо справки об отсутствии полезных ископаемых;
- отсутствие мероприятий по охране объектов растительного и животного мира, либо они

декларативны;

- не представляется согласование Федерального агентства по рыболовству по проектной документации в части воздействия на водные биологические ресурсы;
- отсутствие программы производственного экологического мониторинга, как на период строительства, так и на период эксплуатации;
- не представляется перечень и расчёт затрат на реализацию природоохранных мероприятий и компенсационных выплат;
- графический материал не соответствует требованиям п. 25 и п. 40 Постановления Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 № 87 [6];
- не представляется заключение государственной экологической экспертизы на проектную документацию, указанную в пп. 7, 7.1–7.4 статьи 11 и п. 4.1 статьи 12 Федерального закона «Об экологической экспертизе» [16]; чаще всего такие ситуации возникают в связи с недоработками в результатах инженерно-экологических изысканий, например, отсутствие сведений о размещении проектируемого объекта относительно ООПТ.

Указанные несоответствия были учтены при разработке отраслевого стандарта.

Предложения по нормативам ДВ в составе проектной документации (раздел 8 «Перечень мероприятий по охране окружающей среды») по составу и содержанию должны отвечать современным требованиям законодательства. Перечень таких требований, обязательных к выполнению в составе проектной документации, изложен в Методических указаниях «Унифицированная оценка химических факторов воздействия атомных станций на атмосферный воздух», утверждённых Приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 10.02.2016 № 9/157-П (далее МУ 1.2.1.16.1081–2015) [8].

Согласно МУ 1.2.1.16.1081–2015 (разделы 5 и 6): нормативы допустимых выбросов должны разрабатываться как на период производства строительных работ, так и на период эксплуатации.

Для расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных (загрязняющих) веществ (за исключением радиоактивных веществ), в том числе, включённых в Перечень ЗВ применяются методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе [9].

При этом при подготовке ПД необходимо

учитывать разъяснения ФАУ «Главгосэкспертиза России» по применению Методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утвержденных приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273, которые гласят:

1) методы расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утвержденные данным приказом, подлежат применению с 1 января 2018 года;

2) признана не подлежащей применению на территории Российской Федерации Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86), утвержденная Госкомгидрометом СССР 4 августа 1986 г. № 192, с 1 января 2018 г.

При этом согласно пункту 4 указанного выше приказа Минприроды России документация, разработанная и утвержденная до 1 января 2018 г. на основании расчетов, произведенных в соответствии с Методикой расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86), утвержденной Госкомгидрометом СССР 4 августа 1986 г. № 192, действует на территории Российской Федерации в течение установленного для нее срока.

Таким образом, учитывая положения действующего законодательства, рассмотрение проектной документации, договор о проведении государственной экспертизы которой заключен до 1 января 2018 года, в части оценки расчетов рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе осуществляется на предмет соответствия требованиям Методики расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86), утвержденной Госкомгидрометом СССР 4 августа 1986 г. № 192.

Расчеты рассеивания выбросов загрязняющих веществ в атмосферном воздухе, содержащиеся в проектной документации, договор о проведении государственной экспертизы которой заключен после 31 декабря 2017 года, должны быть выполнены в соответствии с Методами расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе, утвержденными Приказом Минприроды России от 06.06.2017 № 273, и подлежащими применению с 1 января 2018 года.

Для оценки воздействия должны использоваться исходные данные технологической части проекта (подраздел 5 «Технологические решения») и проекта организации строительства

(раздел 6 «Проект организации строительства»).

В случае отсутствия исходных данных в составе разделов 5 и 6 проектной документации должны использоваться данные объекта – аналога или консервативные расчетные оценки. Материалы расчетов выбросов должны представляться обязательным приложением в составе материалов ОВОС, МОЛ, ПМООС, как обоснование полноты и достоверности данных. Для оценки воздействия выбросов загрязняющих веществ следует проводить расчеты рассеивания в соответствии с основными положениями методов [9] с использованием сертифицированных унифицированных программ расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА) с учетом влияния застройки. Для конкретизации уровня воздействия расчеты рассеивания следует проводить в контрольных точках, расположенных на границе санитарно-защитных зон (СЗЗ), ближайшей жилой застройке, на территориях с повышенными требованиями к качеству атмосферного воздуха. Материалы расчетов рассеивания должны представляться в составе материалов предпроектной и проектной документации отдельным приложением в полном объеме. Предложения по нормативам ДВ должны быть подготовлены в составе ПД по каждому источнику и загрязняющему веществу и для объекта государственной экспертизы в целом.

Выполнение вышеприведенных требований в составе проектной документации позволит в дальнейшем для хозяйствующих субъектов, которые осуществляют ввод в эксплуатацию новых или реконструированных объектов со стационарными источниками выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферный воздух, при наличии нормативов ДВ, установленных в том числе на период ведения строительных работ, получить разрешение на выбросы, которые выдаются на срок ведения строительных работ в соответствии с утвержденной проектной документацией или на срок достижения проектных показателей (но не более 2 лет) для вводимых в эксплуатацию новых или реконструированных объектов согласно положениям [8].

Федеральный закон от 24.06.1998 №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» [11] определяет правовые основы обращения с отходами производства и потребления в целях предотвращения вредного воздействия отходов производства и потребления на здоровье человека и окружающую среду, а также вовлечения таких отходов в хозяйственный оборот в качестве дополнительных источников сырья. Пункт 2 статьи 13 устанавливает необходимость отра-

жения данных для подготовки проекта организации работ по сносу или демонтажу объектов капитального строительства в случае, если есть необходимость в проведении этих видов работ: «места складирования демонтированных железобетонных изделий, металлических конструкций, строительного мусора и т.п., согласованные с органами местного самоуправления и территориальными органами санитарно-эпидемиологического надзора в соответствии с нормами СанПиН 2.1.7 1322-03». Положения статей 10-12, 13, 14 учитываются при разработке мероприятий по охране окружающей среды. В статье 24 приведены условия оплаты за негативное воздействие на окружающую среду при размещении отходов.

В связи с внесением изменений в [11] Федеральным законом от 29 декабря 2014 года №458-ФЗ [12] и Федеральным законом от 30 декабря 2008 года №309-ФЗ [13] при разработке раздела стандарта «Термины и определения» необходимо учесть изменения следующих терминов с соответствующими определениями:

отходы производства и потребления (далее – *отходы*) – вещества или предметы, которые образованы в процессе производства, выполнения работ, оказания услуг или в процессе потребления, которые удаляются, предназначены для удаления или подлежат удалению в соответствии с настоящим Федеральным законом;

обращение с отходами – деятельность по сбору, накоплению, транспортированию, обработке, утилизации, обезвреживанию, размещению отходов;

размещение отходов – хранение и захоронение отходов;

хранение отходов – складирование отходов в специализированных объектах сроком более чем одиннадцать месяцев в целях утилизации, обезвреживания, захоронения;

захоронение отходов – изоляция отходов, не подлежащих дальнейшей утилизации, в специальных хранилищах в целях предотвращения попадания вредных веществ в окружающую среду;

утилизация отходов – использование отходов для производства товаров (продукции), выполнения работ, оказания услуг, включая повторное применение отходов, в том числе повторное применение отходов по прямому назначению (рециклинг), их возврат в производственный цикл после соответствующей подготовки (регенерация), а также извлечение полезных компонентов для их повторного применения (рекуперация);

обезвреживание отходов – уменьшение массы отходов, изменение их состава, физических и химических свойств (включая сжигание и (или) обеззараживание на специализированных установках) в целях снижения негативного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую среду;

объекты размещения отходов – специально оборудованные сооружения, предназначенные для размещения отходов (полигон, шламохранилище, в том числе шламовый амбар, хвостохранилище, отвал горных пород и другое) и включающие в себя объекты хранения отходов и объекты захоронения отходов;

трансграничное перемещение отходов – перемещение отходов с территории, находящейся под юрисдикцией одного государства, на территорию (через территорию), находящуюся под юрисдикцией другого государства, или в район, не находящийся под юрисдикцией какого-либо государства, при условии, что такое перемещение отходов затрагивает интересы не менее чем двух государств;

лимит на размещение отходов – предельно допустимое количество отходов конкретного вида, которые разрешается размещать определенным способом на установленный срок в объектах размещения отходов с учетом экологической обстановки на данной территории;

норматив образования отходов – установленное количество отходов конкретного вида при производстве единицы продукции;

паспорт отходов – документ, удостоверяющий принадлежность отходов к отходам соответствующего вида и класса опасности, содержащий сведения об их составе;

вид отходов – совокупность отходов, которые имеют общие признаки в соответствии с системой классификации отходов;

сбор отходов – прием или поступление отходов от физических лиц и юридических лиц в целях дальнейших обработки, утилизации, обезвреживания, транспортирования, размещения таких отходов;

транспортирование отходов – перемещение отходов с помощью транспортных средств вне границ земельного участка, находящегося в собственности юридического лица или индивидуального предпринимателя либо предоставленного им на иных правах;

накопление отходов – временное складирование отходов (на срок не более чем одиннадцать месяцев) в местах (на площадках), обустроенных в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей

среды и законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения, в целях их дальнейших утилизации, обезвреживания, размещения, транспортирования;

обработка отходов – предварительная подготовка отходов к дальнейшей утилизации, включая их сортировку, разборку, очистку;

твердые коммунальные отходы – отходы, образующиеся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами, а также товары, утратившие свои потребительские свойства в процессе их использования физическими лицами в жилых помещениях в целях удовлетворения личных и бытовых нужд. К твердым коммунальным отходам также относятся отходы, образующиеся в процессе деятельности юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и подобные по составу отходам, образующимся в жилых помещениях в процессе потребления физическими лицами;

норматив накопления твердых коммунальных отходов – среднее количество твердых коммунальных отходов, образующихся в единицу времени;

объекты захоронения отходов – предоставленные в пользование в установленном порядке участки недр, подземные сооружения для захоронения отходов I-V классов опасности в соответствии с законодательством Российской Федерации о недрах;

объекты хранения отходов – специально оборудованные сооружения, которые обустроены в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей среды и законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения и предназначены для долгосрочного складирования отходов в целях их последующих утилизации, обезвреживания, захоронения;

объекты обезвреживания отходов – специально оборудованные сооружения, которые обустроены в соответствии с требованиями законодательства в области охраны окружающей среды и законодательства в области обеспечения санитарно-эпидемиологического благополучия населения и предназначены для обезвреживания отходов;

норматив утилизации отходов от использования товаров (далее также – норматив утилизации) – установленное как выраженное в процентах отношение количества товаров определенного вида, упаковки таких товаров, реализованных юридическим лицам, физическим лицам, в том числе индивидуальным предприни-

мателям, и подлежащих утилизации после утраты потребительских свойств, к общему количеству товаров определенного вида, выпущенных в обращение на территории Российской Федерации.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 30 апреля 2013 года №384 утверждены «Правила согласования Федеральным агентством по рыболовству строительства и реконструкции объектов капитального строительства, внедрения новых технологических процессов и осуществления иной деятельности, оказывающей воздействие на водные биологические ресурсы и среду их обитания» [14]. В данном документе установлен порядок согласования Федеральным агентством по рыболовству (его территориальными органами) строительства и реконструкции объектов капитального строительства, внедрения новых технологических процессов и осуществления иной деятельности, оказывающей воздействие на водные биологические ресурсы и среду их обитания.

В п.4, 5 приведены сведения, которые необходимо указать в заявке и прилагаемой к ней документации для согласования строительства и реконструкции объектов капитального строительства в Федеральном агентстве по рыболовству.

Согласно п.9 настоящих Правил решение о согласовании (об отказе в согласовании) деятельности оформляется в виде заключения, которое подписывается руководителем или уполномоченным заместителем руководителя Федерального агентства по рыболовству (его территориального органа) и содержит следующие сведения:

а) краткое описание деятельности и характеристика ее воздействия на водные биологические ресурсы и среду их обитания;

б) меры по сохранению водных биологических ресурсов и среды их обитания, планируемые в соответствии с документацией;

в) условия и ограничения, необходимые для предупреждения или снижения негативного воздействия деятельности на водные биологические ресурсы и среду их обитания (условия забора воды и отведения сточных вод, условия работ в водоохранной и рыбоохранной зонах, прибрежной защитной полосе водного объекта и рыбохозяйственной заповедной зоне, ограничения по срокам и способам производства работ на акватории и другие условия);

г) выводы о допустимости влияния деятельности на состояние водных биологических ресурсов и среду их обитания;

д) решение о согласовании (об отказе в согласовании) осуществления деятельности.

Отсутствие согласования Федерального агентства по рыболовству деятельности, оказывающей воздействие на водные биологические ресурсы и среду их обитания, приводит к получению отрицательного заключения государственной экспертизы.

Приказом №1166 от 25 ноября 2011 года утверждена «Методика исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам». Методика определяет процедуру исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам [15]. Расчет вреда водным биологическим ресурсам, как на период строительства, так и на период эксплуатации, должен быть приведен в соответствующем подразделе раздела ПМООС.

Заключение

Уникальность и сложность объектов использования атомной энергии, в частности АЭС, предполагает тщательную проработку всех вопросов при подготовке, согласовании и утверждении мероприятий по охране окружающей среды, в том числе и мероприятий, связанных с совершенствованием нормативной базы.

В ходе разработки требований к разработке раздела проектной документации «Перечень мероприятий по охране окружающей среды» были проанализированы нормативные документы на предмет наличия в них требований, которые необходимо учесть в проектной документации.

Следует отметить, что за последние два года в отдельные природоохранные законодательные акты Российской Федерации были внесены существенные изменения и приняты для их реализации подзаконные акты, которые должны выполняться при разработке требований к разделу ПМООС в составе проектной документации.

В результате анализа действующего законодательства и нормативно-правовых актов, а также опыта государственных экспертиз определены и систематизированы основополагающие требования, которые были учтены при разработке отраслевого стандарта, касающиеся актуализации и гармонизации требований к составу и содержанию раздела проектной документации «Перечень мероприятий по охране окружающей среды», а также проведено уточнение терминологии с действующими и разрабатываемыми документами Госкорпорации «Росатом».

Список литературы

1. ГОСТ 1.1-2002 Межгосударственная система стандартизации (МГСС). Термины и определения.
2. Федеральный закон от 10.01.2002 №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (Собрание законодательства Российской Федерации, 2002, №2, ст.133).
3. Федеральный закон от 21 июля 2014 года № 219-ФЗ «О внесении изменений в федеральный закон №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» и отдельные законодательные акты Российской Федерации» (с изменениями на 29 декабря 2015).
4. Федеральный закон от 28 декабря 2013 года № 409-ФЗ «О внесении изменений в федеральный закон №7-ФЗ «Об охране окружающей среды».
5. Федеральный закон от 04.05.1999 №96-ФЗ «Об охране атмосферного воздуха» (Собрание законодательства Российской Федерации, 1999, №18, ст.2222).
6. Положение о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию, утв. постановлением Правительства Российской Федерации от 16.02.2008 №87 (Собрание законодательства Российской Федерации, 2008, №8, ст. 744).
7. Абрамова Л.К. Современные требования к порядку установления нормативов предельно-допустимых выбросов загрязняющих веществ в атмосферу для проектируемых атомных станций. /Труды третьей научно-практической конференции с международным участием «Экологическая безопасность АЭС». – Калининград, 19-20 октября 2016г.- Изд-во «Аксиос», Калининград, 2016. – с. 7-9.
8. Методические указания «Унифицированная оценка химических факторов воздействия атомных станций на атмосферный воздух» МУ 1.2.1.16.1081-2015, утвержденные приказом АО «Концерн Росэнергоатом» от 10.02.2016 №9/157-П.
9. Приказ Минприроды от 06.06.2017 № 273 «Об утверждении методов расчетов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе»
10. Методические указания «Разработка материалов оценки воздействия на окружающую среду в составе проектной и иной документации на осуществление видов деятельности в области использования атомной энергии. ОАО «Концерн Росэнергоатом». МУ 1.5.1.99.0097-2012, утвержденные приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом» от 06.07.2012 № 9/632-П.
11. Федеральный закон от 24.06.1998 №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» (Собрание законодательства Российской Федерации, 1998, № 26, ст.3009).
12. Федеральный закон от 29 декабря 2014 года №458-ФЗ «О внесении изменений в федераль-

ный закон от 24.06.1998 №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления».

13. Федеральный закон от 30 декабря 2008 года №309-ФЗ «О внесении изменений в федеральный закон от 24.06.1998 №89-ФЗ «Об отходах производства и потребления»».
14. Постановление Правительства РФ от 30 апреля 2013 г. № 384 «О согласовании Федеральным агентством по рыболовству строительства и реконструкции объектов капитального строительства, внедрения новых технологических процессов и осуществления иной деятельности, оказывающей воздействие на водные биологические ресурсы и среду их обитания».
15. Приказ Росрыболовства от 25.11.2011 №1166 «Об утверждении Методики исчисления размера вреда, причиненного водным биологическим ресурсам».
16. Федеральный закон от 23.11.1995 № 174-ФЗ «Об экологической экспертизе» (Собрание законодательства Российской Федерации, N 48, 27.11.1995, ст.4556).

References

1. Federal Standart 1.1-2002 *Mezhhgosudarstvennaya sistema standartizatsii* [Intergovernmental system of standardization] (IGSS). Terminology and definition.
2. Federal Law (10.01.2002) N7-FZ «*Ob ohrane okruzhayushchej sredy*» [«Environmental protection»] (Collection of laws of Russian Federation, 2002, №2, item 133).
3. Federal Law on the 21 of July, 2014, № 219-FZ «*O vnesenii izmenenij v federal'nyj zakon №7-FZ «Ob ohrane okruzhayushchej sredy» i otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii*» [Changes in federal law N7-FZ «Environmental protection» and discrete legislative acts of Russian Federation] (with changes from 29th of December 2015)».
4. Federal law on the 28th of December 2013 № 409-FZ «*O vnesenii izmenenij v federal'nyj zakon №7-FZ «Ob ohrane okruzhayushchej sredy»»* [«Changes in federal law №7-FZ «Environmental protection»].
5. Federal law on 04.05.1999 №96-FZ «*Ob ohrane atmosfernogo vozduha*» [«Atmospheric air protection»] (Collection of laws of Russian Federation, 1999, №18, item 2222).
6. *Polozhenie o sostave razdelov proektnoj dokumentacii i trebovaniyah k ih sodержaniyu, utv. postanovleniem Pravitel'stva Rossijskoj Federacii ot 16.02.2008 №87* [Character of composition of project documentation sections and demands to their content, stated by the resolution of Russian Federation Government on 16.02.2008 №87.] (Collection of laws of Russian Federation, 2006, №8, item 744).
7. Abramova L.K. *Sovremennye trebovaniya k por-yadku ustanovleniya normativov predel'no-dopustimyh vybrosov zagryaznyayushchih veshchestv v atmosferu dlya proektiruemyh atomnyh stancij*. [Modern demands for order of statement norms of maximum admissible releases of pollutants into atmosphere for projected nuclear power plants.] / *Proceedings of the third scientific practical conference with international attendance «Ecological safety of NPP»*. – Kaliningrad, 19-20th of October 2016. – Publ. «Aksios», Kaliningrad, 2016. – p. 7-9.
8. *Metodicheskie ukazaniya «Unificirovannaya ocenka himicheskikh faktorov vozdeystviya atomnyh stancij na atmosfernyj vozduh»* [Methodological guidelines «Uniform assessment of influence of chemical factors from nuclear power plants into the air»] MU 1.2.1.16.1081-2015, stated by the obey of JS-C «Concern Rosenergoatom» form 10.02.2016 №9/157-P.
9. Order of Natural Resources Ministry on 06.06.2017 № 273 «*Ob utverzhdenii metodov raschetov rasseivaniya vybrosov vrednyh (zagryaznyayushchih) veshchestv v atmosfernom vozduhe*» [«On approval harmful (polluting) substances emissions dispersion calculation methods to air»].
10. *Metodicheskie ukazaniya «Razrabotka materialov ocenki vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu v sostave proektnoj i inoj dokumentacii na osushchestvlenie vidov deyatel'nosti v oblasti ispol'zovaniya atomnoj ehnergii. OAO «Koncern Rosehnergoatom»*. [Methodological guidelines «Developing of materials for assessment the influence environment in composition of project and other documentation for realization types of activity in field of atomic energy using. JSK «Concern Rosenergoatom»]. MU 1.5.1.99.0097-2012, stated by order JSK «Concern Rosenergoatom» on 06.07.2012 № 9/632-P.
11. Federal law on 24.06.1998 №89-FZ «*Ob othodah proizvodstva i potrebleniya*» [«Wastes of producing and consumption»] (Collection of laws of Russian Federation, 1998, №26, item 3009).
12. Federal law on 29th of December 2014 №458-FZ «*O vnesenii izmenenij v federal'nyj zakon ot 24.06.1998 №89-FZ «Ob othodah proizvodstva i potrebleniya»* [«Changes in federal law on 24.06.1998 №89-FZ «Wastes of producing and consumption»»].
13. Federal law on 30th of December 2008 №309-FZ «*O vnesenii izmenenij v federal'nyj zakon ot 24.06.1998 №89-FZ «Ob othodah proizvodstva i potrebleniya»»* [«Changes in federal law on 24.06.1998 №89-FZ «Wastes of producing and consumption»»].
14. Statement of the Russian Federation Government on 30th of April 2013 № 384 «*O soglasovanii Federal'nym agentstvom po rybolovstvu stroitel'stva i rekonstrukcii ob'ektov kapital'nogo stroitel'stva, vnedreniya novykh tekhnologicheskikh processov i osushchestvleniya inoj deyatel'nosti, okazyvayushchej vozdeystvie na vodnye biologicheskie resursy i*

sredu ih obitaniya». [«Federal agency on fishing agreement for building and reconstruction of fundamental objects of building, introduction of new technological processes and realization another types of activity, influencing water biological resources and environment»].

15. Order of Russian Fishing Agency on 25.11.2011 №1166 «*Ob utverzhdenii Metodiki ischisleniya razmera vreda, prichinennogo vodnym biologicheskim resursam*» [«Statement of method of evaluating the harm level, implicated to water biological resources»].
16. Federal law on 23.11.1995 № 174-FZ «*Ob ekologicheskoy ekspertize*» [«On ecological expertise»] (Collection of laws of Russian Federation, 1995, №48, item 4556).

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК.550.837.3

Специфика интегрированных мембранных технологий в сочетании с ионным обменом для целей водоподготовки

А.М. Акимов, С.А. Котельникова

ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия, e-mail: cvetlana.83@inbox.ru

Статья поступила 13.09.2018 г.; после доработки 14.09.2018 г.

Аннотация

Применение ионообменных и термических методов деминерализации воды выявило наличие ряда недостатков (необходимость регенерации, громоздкое и дорогое оборудование, дорогие иониты), необходимость нейтрализации после регенерационных растворов. Это породило необходимость развития технологий на основе баромембранных технологий.

Ключевые слова: обратный осмос, нанофильтрация, ультрафильтрация, микрофильтрация, мембранные аппараты.

Specifics of integrated membrane technologies in combination with ion exchange for water treatment purposes

А.М. Akimov, S.A. Kotelnikova

Sevastopol state University, Sevastopol, 299002 Russiae-mail: cvetlana.83@inbox.ru)

Received 13.09.2018 y.; received in final form 14.09.2018 y.

Abstract

The use of ion-exchange and thermal methods of water demineralization revealed a number of shortcomings (the need for regeneration, cumbersome and expensive equipment, expensive ions), the need to neutralize after regeneration solutions. This gave rise to the need to develop technologies based on baromembrane technologies.

Keywords: reverse osmosis, nanofiltration, ultrafiltration, microfiltration, membrane devices.

Введение

Использование баромембранных методов (микрофильтрации, ультрафильтрации, нанофильтрации, обратного осмоса) в составе схем водоподготовки энергетических объектов открывает большие перспективы как с экологической, так и с экономической точек зрения, по-

скольку позволяет отказаться от большого количества дорогостоящих реагентов и одновременно избавляться от сточных вод, содержащих эти реагенты. Данное оборудование компактно, обладает низкой металлоемкостью, легко автоматизируется и может вводиться в эксплуатацию в очень сжатые сроки.

Перспективно внедрение комплексных малоотходных схем с применением мембранных

методов совместно с методами ионного обмена, дистилляции и реагентного осаждения. Экономически целесообразно внедрять мембранные методы в состав существующих технологических схем водоподготовки с целью повышения их экономических и экологических характеристик.

Таким образом, назрела острая необходимость в проведении работ по совершенствованию конструкций устаревших и экономически неэффективных водоподготовительных установок, а также поиску новых оптимальных технологических схем с применением современных методов подготовки воды и оптимизации их работы.

Под воздействием указанных факторов за последние пятнадцать лет в России и странах СНГ произошли революционные сдвиги в сознании потребителей, получившие свое выражение на практике в переходе к внедрению современных процессов водоподготовки, основанных на мембранных методах разделения (микро-, ультра-, нанофильтрация, обратный осмос) в сочетании с технологиями противоточного ионирования и/или электродеионизацией.

Ультрафильтрация обеспечивает предподготовку природной воды перед ее дальнейшей деминерализацией. Ультрафильтрация, заменяя стадии известкования с коагуляцией и осветлительного фильтрования, обладает следующими преимуществами:

- резко сокращается потребление реагентов;
- потребление воды на собственные нужды менее 15 % (но может быть снижено и до 2-5 %);
- в фильтрате практически отсутствуют взвеси и коллоиды.

Обратный осмос (или нанофильтрация в комбинации с обратным осмосом) для целей деминерализации также обладают рядом преимуществ перед схемой традиционного двухступенчатого параллельноточного ионирования:

- во-первых, применение мембранных технологий не сопровождается затратами больших количеств реагентов (кислот и щелочей) на регенерации;
- во-вторых, исключается образование высокоминерализованных стоков, вызванных сбросом избытков реагентов при регенерациях;
- в-третьих, достигается значительно более высокая, чем при ионном обмене, степень удаления из обрабатываемой воды органических соединений (в том числе и неполярных) и коллоидной кремневки;

- в-четвертых, отсутствует необходимость нейтрализации сбрасываемых стоков.

В конечном итоге вышеперечисленные обстоятельства приводят к тому, что эксплуатационные затраты при использовании мембранных методов разделения оказываются существенно ниже, чем в случае традиционной технологии ионирования.

Наряду в вышеперечисленными достоинствами баромембранных технологий необходимо отметить и присущие им недостатки:

- рост расходов электроэнергии при эксплуатации;
- увеличение потребления воды на собственные нужды.

Рост затрат на электроэнергию связан с необходимостью применения в обратноосмотических установках насосного оборудования, развивающего давление существенно более высокое, чем в традиционных схемах водоподготовки, где оно редко превышает 6 бар. Этот недостаток в меньшей степени касается установок ультрафильтрации, которые работают при давлениях воды, сопоставимых со стандартными методами очистки.

Высокие расходы воды на собственные нужды систем обратного осмоса связаны с необходимостью работы обратноосмотических мембран в тангенциальном режиме. При обработке поверхностных и артезианских вод гидравлический КПД установок обратного осмоса составляет, как правило, 70-80 %, то есть 20 - 30 % подаваемой воды необходимо сбрасывать в виде концентрата. При увеличении гидравлического КПД из-за эффекта концентрационной поляризации и, как следствие, интенсификации процесса отложения солей на поверхности мембран снижается качество пермеата и возрастает частота проведения химических промывок.

Однако расчеты показывают, что в целом ряде случаев при обработке поверхностных вод потребление воды на собственные нужды можно уменьшить с 20 - 30 % до 5 -10 %, применив повторную обработку концентрата на дополнительных обратноосмотических установках.

Например, такая технология была разработана ЗАО «НПК Медиана- Фильтр» и опробована в ходе пилотных испытаний на Каргалинской ТЭЦ (рисунок 1, рисунок 2).

В данном проекте предусматривалось использование в качестве исходной воды для питания котлов на установке деминерализации подрусловой воды с добавлением регенерационных стоков от Na-катионитовых фильтров установки умягчения и H-OH-фильтров деминерализации.

зации. После реконструкции максимальная производительность системы по обессоленной воде должна составлять 600 м³/ч, количество стоков, подаваемых на захоронение, не должно превышать 16 м³/ч, что соответствует потреблению

воды на собственные нужды менее 3 %, а гидравлический КПД системы обратного осмоса с концентрированием - 97,4%.

Таблица 1. Качественный состав исходной воды

Наименование компонентов	Ед. изм.	Величина
Жесткость общая	мг-экв/дм ³	7.1
Щелочность общая	мг-экв/дм ³	4.5
Кальций, Ca ⁺²	мг/дм ³	4.2
Магний, Mg ⁺²	мг/дм ³	2.4
Хлориды, Cl ⁻¹	мг/дм ³	121
Сульфаты, SO ₄ ⁻²	мг/дм ³	135
Кремниевая кислота, по SiO ₂	мг/дм ³	5.2
Окисляемость	мгО ₂ /дм ³	0.64
Железо общее	мг/дм ³	менее 0,1
pH	-	7.8

Цель испытаний состояла в проверке возможности концентрирования стоков с базовых установок обратного осмоса с помощью дополнительных обратноосмотических установок. Необходимо было определить допустимые параметры исходной воды, подаваемой на эти установки, подобрать оптимальные режимы работы, дозы химических реагентов и решить ряд других задач. В экспериментах были задействованы пилотные установки обратного осмоса и ультрафильтрации производства НПК «Медиа-на-Фильтр». Исходная вода осветлялась на установке ультрафильтрации и направлялась на

установку обратного осмоса У001. Концентрат (сточные воды) с установки У001 собирался в накопительной емкости, из которой поступал на установку обратного осмоса У002. Пермеат с установок обратного осмоса У001 и У002 смешивался и направлялся на дальнейшую обработку для получения обессоленной воды. Концентрат с У002 поступал на установку обратного осмоса У003 для последней стадии концентрирования. Получаемый пермеат с У003 возвращался на вход У001, а концентрат подавался на захоронение.

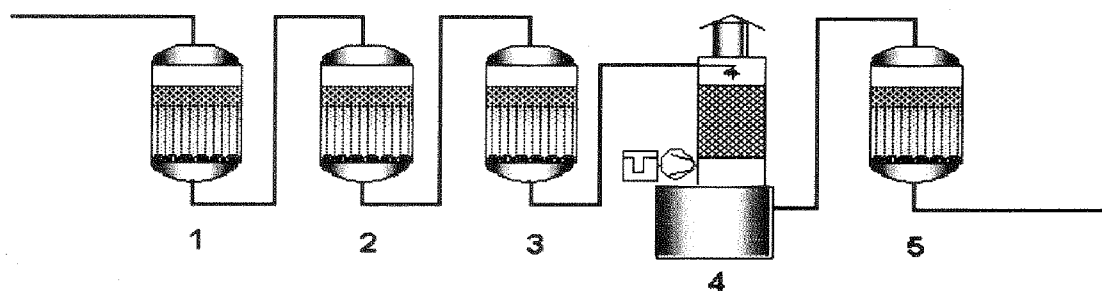


Рис. 1. Технологическая схема ВПУ на Каргалинской ТЭЦ до реконструкции

1. Фильтры Н-катионирования 1 степени.
2. Фильтры ОН-анионирования 1 степени.
3. Фильтры Н-катионирования 2 степени.
4. Декарбонизатор.
5. Фильтры ОН-анионирования 2 степени.

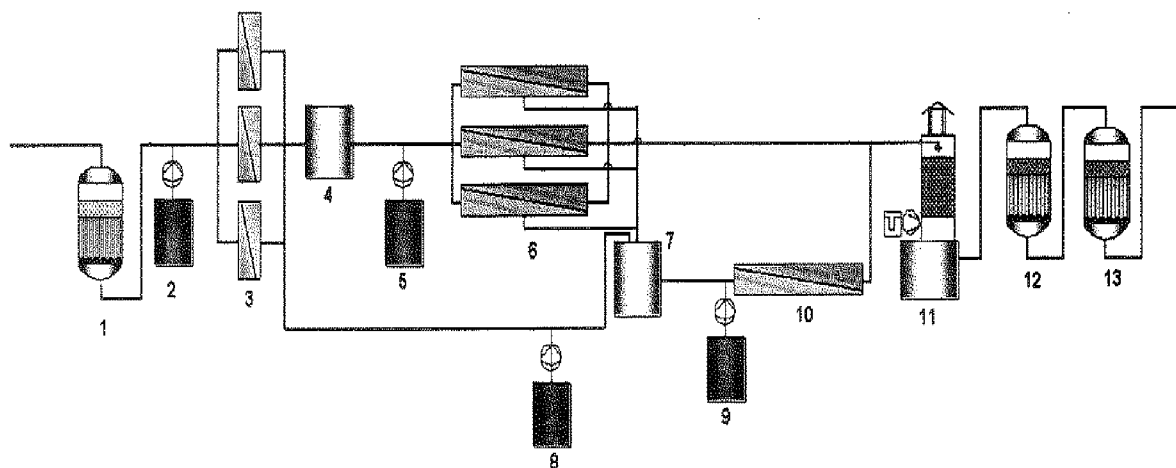


Рис. 2. Технологическая схема ВПУ на Каргалинской ТЭЦ после реконструкции

1. Механические фильтры. 2. Станция дозирования коагулянта. 3. Установка ультрафильтрации (УУФ). 4. Бак осветленной воды. 5. Станция дозирования ингибитора. 6. Установка обратного осмоса 1 (У001). 7. Бак сбора концентрата. 8. Станция дозирования ингибитора. 9. Станция коррекции pH. 10. Установка обратного осмоса 2 (У002). 11. Декарбонизатор и бак частично обессоленной воды. 12. Фильтры H-катионирования 2 ступени. 13. Фильтры ОН-анионирования 2 ступени.

Среди требований, предъявляемых производителями обратноосмотических мембран к питательной воде обратноосмотических установок, определяющими являются: содержание окислителей, диапазон значений pH, температура, коллоидный индекс (SDI), солесодержание. С точки зрения переработки обратноосмотического концентрата наиболее критичными оказались следующие параметры: значение SDI и pH.

Индекс SDI, определяемый по стандартной методике, служит для оценки интенсивности коллоидного загрязнения мембранных элементов. Практика показала, что методами традиционной предочистки на осветлителях и механических фильтрах только в исключительных случаях удастся добиваться значения SDI питательной воды для установок обратного осмоса $SDI \sim 4$ (при максимальном значении $SDI = 6.67$). Однако при этом значение SDI для концентрата оказывается выше 5, в то время как производители мембранных элементов рекомендуют поддерживать эту величину для питательной воды $SDI < 5$. Предподготовка на установках ультрафильтрации уверенно позволяет снизить коллоидный индекс фильтрата до $SDI < 3$, и в этом случае значение SDI для концентрата после обратноосмотической установки обычно не превышает 5. Этим обстоятельством был обусловлен выбор ультрафильтрации в качестве предподготовки воды, подаваемой на установку обратного осмоса У001.

Помимо проблемы с коллоидными отложениями могут возникнуть сложности, обуслов-

ленные кристаллизацией на поверхности обратноосмотических мембран малорастворимых солей. Карбонаты и сульфаты солей жесткости, гидрооксиды, фосфаты и силикаты могут формировать отложения за счет превышения растворимости, возникающей как вследствие концентрационной поляризации, так и в результате смещения значения pH концентрата в щелочную область. Наличие солевых отложений на поверхности мембраны приводит к снижению производительности и ухудшению качества пермеата. Некоторые отложения невозможно удалить с поверхности мембраны, не повредив саму мембрану, что, тем самым, приводит к выходу мембранного элемента из строя.

Для предотвращения образования отложений применяют следующие меры (по отдельности или совместно):

- уменьшение гидравлического КПД установки;
- коррекция значения pH подаваемой воды (как правило, подкисление);
- ингибирование процесса кристаллизации малорастворимых соединений;
- умягчение исходной воды.

На современном этапе применение ингибиторов рассматривается как надежное и экономически выгодное решение, обеспечивающее безопасные условия работы персонала, особенно при больших производительностях установок обратного осмоса (от десятков кубических метров в час и более). Ингибирование как метод предотвращения отложений в установках обрат-

ного осмоса доказало свою высокую эффективность, например, при проведении экспериментов на Каргалинской ТЭЦ.

Основные задачи, которые необходимо было решить в процессе проведения пилотных испытаний:

- сокращение количества потребляемых реагентов и образующихся сточных вод при работе системы водоподготовки на смеси сточных вод всего комплекса и природной воды;
- установка водоподготовки должна выполнять функции по концентрированию сточных вод до максимально возможных значений и подготовке их для захоронения в подземные горизонты.

Поставленная задача была решена, что и было подтверждено в ходе пилотных испытаний.

Результаты пилотных испытаний на Каргалинской ТЭЦ по концентрированию стоков обратноосмотических установок нашли практическое применение при разработке технологических решений для реконструкции ВПУ на ТЭЦ-9 и ТЭЦ-16 ОАО «Мосэнерго».

В существующих схемах ВПУ для подпитки котлов на обеих ТЭЦ в качестве исходной воды использовали дорогостоящую водопроводную воду, которая подавалась на цепочки ионообменного обессоливания, представленные на рис. 1. Такая технологическая схема имела ряд недостатков:

- высокие эксплуатационные затраты на водопроводную воду;
- необходимость регулярной досыпки и замены смол;
- большие расходы на химические реагенты;
- необходимость нейтрализации стоков;
- образование высокоминерализованных стоков;
- значительные затраты на ремонт и обслуживание оборудования, контактирующего с агрессивными веществами;
- необходимость больших складских запасов кислоты и щелочи.

При реконструкции ВПУ ставились следующие задачи:

- перейти на речную воду;
- уменьшить потребление воды на собственные нужды ВПУ;
- сократить расходы реагентов при одновременном повышении качества обессоленной воды.

Для предподготовки речной воды перед установками обратного осмоса была выбрана технология ультрафильтрации.

Реализованная на ТЭЦ-16 водоподготовительной установки схема представлена на рисунке 2.

Подогретая вода из р. Москвы проходит очистку на механических фильтрах (1) и поступает в баки исходной воды, откуда направляется на установки ультрафильтрации УУФ (3). Получаемый фильтрат с УУФ собирается в баки осветленной воды, которая используется на проведение промывок установок ультрафильтрации и подается на УОО 1 (6). Концентрат с УОО 1 поступает в накопительную емкость (7), из которой направляется на установку концентрирования стоков УОО 2 (10). Было также предусмотрено поступление осветленной воды в накопительную емкость (7) для возможности работы УОО 2 и на осветленной воде. Получаемый пермеат с УОО1 и УОО 2 объединяется и поступает в декарбонизатор, совмещенный с БЧОВ, откуда направляется на цепочки ионитных фильтров Н-ОН для дальнейшей очистки.

Вышеперечисленные технологии водоподготовки и минимизации стоков относятся к интегрированным мембранным технологиям.

Заключение

Применение интегрированных мембранных технологий в сочетании с ионным обменом (прежде всего основанном на методах противоточной регенерации) для целей водоподготовки в энергетике позволяет добиться снижения себестоимости обессоленной воды до 12-20 рублей за кубический метр при одновременном сокращении водопотребления и количество солей поступающих в окружающую среду со сточными водами.

Список литературы

1. Справочник для профессионалов «Водоподготовка» под редакцией д.т.н. Беликова С.Е. // Акватерм. – 2007г.
2. Акимов А.М., Котельникова С.А. Условия подготовки исходной воды для обработки на баромембранных установках. // Энергетические установки и технологии, 2018. – Т.4. - №2. – С. 57-61.
3. Пантелеев А.А., Громов С.Л. Сидоров А.Р., Неврев Е.В. Установка для водоподготовки / Свидетельство на полезную модель № 68501, 2007.
4. Федосеева Е.Б. Применение нанофильтрационных мембран в энергетике. Семинар «Современные ВПУ в промышленной водоподготовке». Волгоград: ВГТУ, 2006.

References

1. A reference book for professionals "Water" under the editorship of Professor E. S. Belikov // Aquatherm. - 2007.
2. Akimov A. M., Kotelnikova S. A. Conditions for preparation of raw water for treatment at barometric installations. // Power plants and technologies, 2018. - Vol. 4. - №2. - P. 57-61.
3. Panteleev A. A., Gromov S. L., Si-dorov A. R., Nevrev E. V. Installation for water treatment / Evidence for utility model No. 68501, 2007.
4. Fedoseeva, E. B. the Use of nanofiltration membranes in the energy sector. Seminar "Modern VPU in industrial water preparation". Volgograd: VSTU, 2006.

УДК 628.339.066

Выбор комбинации фильтрующего материала в зависимости от технологических параметров процесса и очищаемой среды

Н.И. Черкашина

ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. Selyanskij-AS@yandex.ru

Статья поступила 12.09.2018 г.; после доработки 14.09.2018 г.

Аннотация

Предложена модернизация математической модели процесса фильтрации в программе Delphi7 на примере системы СВО-5 для подбора наилучшей комбинации фильтрующего материала в зависимости от состава очищаемой среды и технологических параметров очистки. Программа способна анализировать и выбирать оптимальный вариант цена-качество при загрузке ионита, динамику сорбционно-термической технологии и гидродинамику процесса очистки сложных растворов, учитывать конкурентную сорбцию ионов в различных режимных условиях.

Ключевые слова: математическое описание, коэффициент фильтрации, граничные условия, ионообменные материалы, сорбция, обменная емкость, система СВО-5, насыпная масса сорбента.

Select the combination of filter material depending on the technological parameters of the process and clean up the environment

N.I. Cherkashina

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. selyanskij-as@ya.ru

Received 12.09.2018 y.; received in final form 14.09.2018 y.

Abstract

The modernization of the mathematical model of the filtration process in the Delphi 7 program on the example of the SWT-5 system for the selection of the best combination of the filtering material depending on the on the composition of the parameters of the purified medium and the technological parameters of purification. The program is able to analyze and choose the best option price-quality when loading ionite, the dynamics of sorption-thermal technology and the hydrodynamics of the process of purification of complex solutions, can take into account the competitive sorption of ions in different operating conditions.

Keywords: mathematical description, filtration coefficient, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, water cooling system SWC-5, bulk weight of the sorbent.

Введение

Несмотря на разнообразие применяемых адсорбентов, многие из них не удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых к материалам подобного типа, в связи с чем поиск и разработка новых сорбционных материалов ведется постоянно. Сорбционные материалы поглощают из водных растворов металлы практически до любых остаточных концентраций [1-2].

В данной работе рассматривались механи-

ческие, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5 [3].

Математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, рассчитанный коэффициент фильтрации представлен в программе Delphi7 на примере системы СВО-5.

В данной работе был исследован ряд сорбционно-активных материалов:

• аниониты - АВ-17-8, АВ-17П, Амберлит IRA-458, Вофатит SBW, Варион АТ-660, Дауэкс

SBR-(P), Дауэкс MSA-1, Смола Purolite A-860, Тульсион А-72(МП);

- КУ-2-8, КУ-23, Амберлит IR-120, Тульсион Т-42, Смола DOWEX HCR-S/S, Сорбент АС, АНКБ-35, «Фолиоокс-КГО» сорбционные характеристики изучены [4-8].

Эти сорбенты можно использовать для очистки или доочистки сточных вод различных промышленных предприятий, обезвреживания газовых выбросов, ликвидации разливов нефти и других химических продуктов в настоящее время их производят в основном из углей различных марок, торфа и древесного угля.

Цель данной работы – модернизация математического описание в программе Delphi7, которая позволяет подобрать наилучшую комбинацию фильтрующего материала в зависимости от состава очищаемой среды и технологических параметров процесса.

Для реализации цели были решены следующие задачи:

- исследовались сорбционные характеристики

наиболее распространенных фильтрующих материалов для очистки технологических сред (материалы: КУ-2-8, Амберлит IR-120, Тульсион Т-42, АВ-17-8, Варион АТ-660), подходящих для режима работы системы СВО-5 с помощью программы Delphi7;

параметры очищаемой среды были выбраны для широкого спектра промышленной деятельности: гальвано-химические стоки, общие стоки машиностроительного предприятия, общий сток металлургического предприятия и другие по катионам Cu^{2+} , Pb^{2+} , Fe^{3+} , Co^{2+} , анионам Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- для всего диапазона материалов;

- расчетно – экспериментальным методом выбрали наиболее выгодную комбинацию фильтрующих материалов для конкретной технологической среды в зависимости от ее состава и экономической целесообразности.

Пример рабочего окна в программе Delphi7 для получения данных о схеме СВО – 5 представлен на рис. 1.

Панель

G1	60	м3/ч	Сброс	Р	985	*
G2	35	м3/ч		п	0,5	*
T1	98	°C	Расчитать T2 и T7			
T3	20	°C	Установка стандарт			
T4	60	°C	R	O		
T5	20	°C			Насыпная масса КФ	Насыпная масса АФ
T6	55	°C			820	кг/м3
G3	35	м3/ч			700	кг/м3
					Расчет Кф	
T2	74,6666666666667	°C	Кпроницаемости		4,8	Е-8
T7	54,25	°C	Кфильтрации		1,70818064516129	Е-8 м/с
					Расчет Кпр	
					Расчет Кф	

Сигнализация

T2	75	T7	60
	20		20
G1	60	Кф	12
	35		0,3
Расчитать		Сброс	

Рис.1. Рабочее окно программы Delphi7 схемы СВО – 5

Расчетная часть

Разработанная нами программа рассчитывает изменение коэффициента фильтрации для сорбционных материалов применимых к данной системе в зависимости от ее технических характеристик.

В математическое описание в программе Delphi7 были добавлены уравнения 1,2,3. Уравнение Фрейндлиха для конкурентной сорбции K_f в условиях очистки будет отличаться, если в среде содержатся ионы других веществ:

$$X_{eq} = KC_{eq} \cdot \frac{1}{n} \quad (1)$$

где X_{eq} – удельная адсорбция, мг-экв/л; C_{eq} – равновесная концентрация, мг-экв/л; K , $1/n$ – константы.

Для сравнения сорбентов между собой вводим статическую обменную емкость (COE) ионита (мг-экв/г), которая вычисляется на основании расчетных данных по формуле:

$$COE = \frac{C_0 - C}{m} \cdot V \quad (2)$$

где C_0 и C – исходная и конечная концентрация в растворе, мг/л; V – объем раствора, м³; m – масса ионита, кг.

Рассчитываем динамическую обменную емкость (ДОЕ) можно по формуле:

$$ДОЕ = \frac{C \cdot V_{проскок}}{V_{ионита}} \quad (3)$$

где C – концентрация ионов в воде, мг-экв/л; $V_{проскок}$ – количество воды, пропущенной через фильтр до проскока поглощаемого иона, м³; $V_{ионита}$ – объем ионита, м³.

Были определены зависимости COE от концентрации катионита и анионита на примере ионов меди и хлора, представленные на рис. 2 и 3.

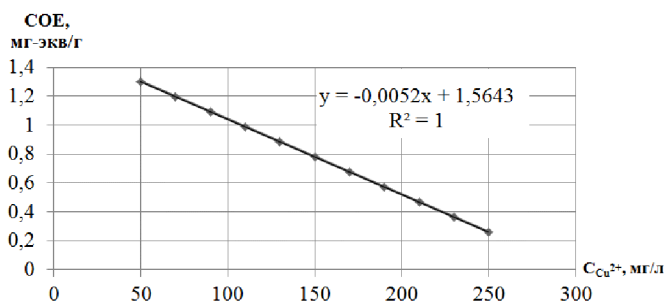


Рис.2. Зависимость COE от концентрации ионов меди.

Используя математическое описание процесса фильтрации представленное в программе Delphi7 можно выбрать оптимальные сорбционные материалы, их возможные комбинации для

реализации различных задач при сорбционной очистке сточных вод.

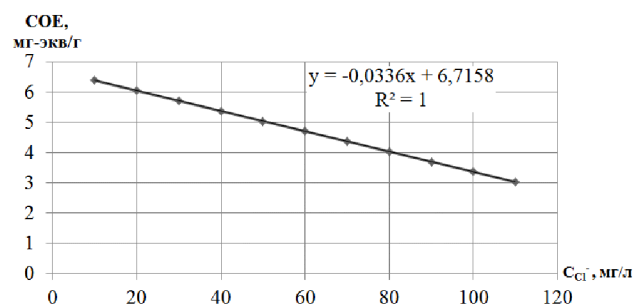


Рис.3. Зависимость COE от концентрации ионов хлора.

В данной работе рассматривались механические, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5.

Примеры рабочих окон для получения экспериментальных точек представлены на рис. 4-5.

Рис. 4. Рабочее окно в программе Delphi7 для получения зависимости COE от концентрации ионов хлора.

Рис. 5. Рабочее окно в программе Delphi7 для получения зависимости ДОЕ для анионитового фильтра.

Используются на первой стадии ионирования катионит в + Н форме, а на второй стадии анионит в – ОН форме, который обеспечивает высокую эффективность извлечения хлоридов на анионите АВ-17-8.

Исследованы среды различных предприятий, весь спектр показан в таблице 3 на примере

концентрации ионов меди в очищаемой среде.

Таблица 3. Значения концентраций на различных промышленных предприятиях

Концентрация меди, мг/л	0,44	0,44	1,4	2,76
Спектр промышленной деятельности	общезаводские стоки медно-никелевого комбината	общезаводские стоки медно-никелевого комбината	общие стоки машиностроительного предприятия	цех рафинирования меди и медно-никелевого комбината
Концентрация меди, мг/л	6,6	25	75	130
Спектр промышленной деятельности	плавильный цех медно-никелевого комбината	золотоизвлекающее предприятие по полному иловому процессу	гальваническое производство	общий сток металлургического предприятия

А также на примере концентрации ионов свинца в виде диаграммы на рис. 6.

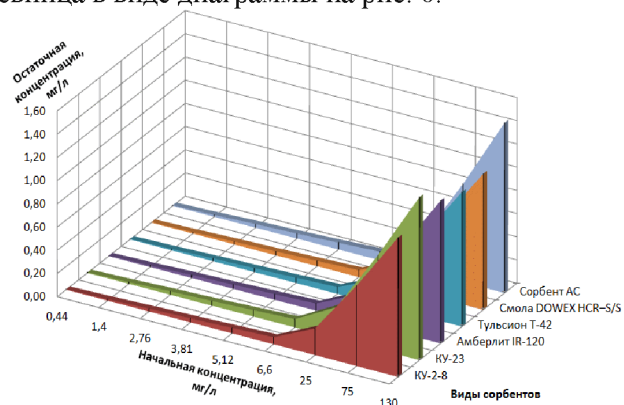


Рис.6. Диаграмма зависимости остаточных концен-

траций ионов свинца.

При наличии в растворе, контактирующем с ионообменным материалом, помимо удаляемого иона, других схожих по химической природе ионов, имеет место процесс конкурентного связывания [9]. Выбранные материалы (иониты) должны подходить под типовую схему очистки без изменения системы или ее составляющих и сохранением своих сорбционных параметров, так же учитывалась экономическая составляющая в балансе с эффективностью очистки, коэффициент соотношения испытываемых сорбентов (отражающий отношение коэффициента очистки и стоимости) приведен в таблице 4.

Таблица 4. Статистические данные по сорбентам в соотношении цена-качество

Марка сорбента	Динамическая обменная емкость, мг-экв/м ³	Стоимость сорбента, руб/кг	Коэффициент соотношения
КУ-2-8	500	49	10,2
КУ-23	420	60	7
Амберлит IR-120	530	150	3,53
Тульсион Т-42	430	120	3,58
Смола DOWEX HCR-S/S	450	216	2,08
Сорбент АС	670	87	7,7
АВ-17-8	700	153	4,58
Амберлит IRA-458	700	110	6,36

При достоверной загрузке массива данных программа способна анализировать и выбирать оптимальный вариант цена-качество при загрузке ионита для схемы образца СВО-5. Для проверки адекватности математической модели были взяты показатели технологических сред объ-

ектов, работа систем очистки которых, похожи на схему СВО-5.

Технологические характеристики очищаемой среды по анионам и катионам Балаковской АЭС и Череповецкого металлургического комбината представлены в таблице 5.

Таблица 5. Показатели технологической среды Балаковской АЭС (объект 1) и Череповецкого металлургического комбината (объект 2)

Ион	Балаковская АЭС		Череповецкий металлургический комбинат	
	Концентрация, мг/л	ПДК, мг/л	Концентрация, мг/л	ПДК, мг/л
Cu^{2+}	0,3	1	4,43	1
Ca^{2+}	56	180	61,6	180
Mg^{2+}	7,2	65	15,8	65
Na^{+}	5,8	200	6,3	0,03
Cl^{-}	50	250	143	250
NO_3^{-}	0,8	45	-	45
NH_4^{+}	1,2	2	0,5	2
SiO_3^{2-}	5	10	6,7	10
Fe^{3+}	0,4	0,5	12,1	0,5

Для очистки технологической среды для объекта 2 от ионов меди и железа, натрия наиболее выгодный вариант по сорбционным и экономической характеристикам являются: анионитовый фильтр-АВ-17 - 1 шт. и Сорбент АС - 1 шт., катионитовый-КУ-2-8 - 2 шт. Если взять объект 1 с другой концентрацией ионов, наилучший вариант фильтрующей загрузки будет: анионитовый фильтр-АВ-17 - 2 шт, катионитовый-КУ-2-8 - 2шт.

В процессе исследований было установлено, что использование смеси ионитов способствует повышению эффективности сорбционной очистки растворов от ионов, причем оптимальные состав и степень протонирования смеси определяются как типом, так и формой присутствия металла в растворе, а также и кислотностью последнего.

Особого внимания заслуживает факт высокого сродства смеси, содержащей 75 % катионита и 25 % анионита.

При использовании смеси наблюдается повышение емкости индивидуальных ионитов по отношению к ионам фтора и хлора, которое объясняется созданием условий для максимальной реализации их емкостных свойств. К существенным достоинствам применения смеси ионитов следует отнести также стабилизацию кислотности обрабатываемой воды на уровне рН 7...7,5 и незначительное изменение удельного объема (не более 7 %) при регенерации и переводе в рабочую форму.

Выводы

Полученная математическая модель позво-

ляет учитывать:

- формальную кинетику гетерогенной сорбции;
- динамику сорбционно-термической технологии и гидродинамику процесса очистки сложных растворов в различных режимных условиях;
- начальное и оперативное тестирование сорбентов;
- разработка инструмента комплексных расчетов высокоэффективных сорбционных систем на примере СВО-5, отвечающих требованиям высоких технологий.

Все это позволяет подбирать оптимальные комбинации сорбционных смесей для очистки жидких технологических сред на примере СВО-5, не проводя натурные испытания на объекте, не изменяя существующей системы очистки.

Список литературы

1. Солуковцева Т.В., Лысенко А.В. Разработка способа очистки сточных вод от ионов меди отходами свеклосахарного производства // Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научной конференции. В 2-х томах. Ответственный редактор А.А. Горохов. 2017. С. 68-71.
2. Дремичева Е.С., Лаптев А.Г. Моделирование сорбционного метода очистки сточных вод от нефтепродуктов и тяжелых металлов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2017. Т. 6. С. 81-85.
3. Сукрушев А.В., Браславский Ю.В. Водный режим контуров АЭС: учеб. пособие. – Севастополь: СТУЯЭиП, 2013. – 220 с.
4. Черкашина Н.И. Очистка сточных вод от ионов

- металлов сорбентами из природных материалов на основе лигнина / Н.И. Черкашина, А.С. Черкашин, И.И. Марончук // Новый университет. Серия: Технические науки. 2015. № 11-12 (45-46). С. 51-57.
5. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ, 2016. – 356 с.
 6. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СНУЯЭиП, 2011. – С. 22.
 7. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Кульченко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность. - 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.
 8. Пат. 78908 Украины, МПК51 В 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун-т ядерной энергии и промышленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
 9. Черкашина Н.И. Конкурентная сорбция лигниновых препаратов для очистки сточных вод / Н.И. Черкашина, А.В. Любушкина, А.О. Литвинова/ Энергетические установки и технологии, 2018, Т. 4, № 2. С. 109-114.
 - from natural materials based on lignin] New University. Series: Technical Sciences. 2015. No. 11-12 (45-46). S. 51-57.
 5. Cherkashina N.I., Vedisheva V.A. Issledovanie effektivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuclidov iz texnologicheskij sred [The study of effective sorption materials for extraction of radionuclides of technological environments Materials of scientific-practical conference "Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety" (15 – 18 June 2016, Sevastopol). –Sevastopol: SevGU, 2016. – 356 p.
 6. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkih radioaktivnix otxodov [The technology of obtaining sorption materials based on lignin for utilization of LRW] The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences – Sevastopol: publishing house SNUNE and industry 2011. – P. 22.
 7. Cherkashina N.I., Erofeev V.A., Kulenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pererabotki rastitelnogo sirjz pri oчитке stochnix vod I tehnologicheskix sred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] Environmental safety, 2013, the Issue Vol. 2(16) – Pp. 89-92.
 8. Cherkashina N.I., Erofeev V. A., Pat. 93824 Ukraine, IPC 51 B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. Metod proizvodstva modifitsirovannogo kostochkovogo sorbenta "Foliox- MSP" [A method of producing stone of the modified powder of organic sorbent "Foliox- MSP"]; the applicant and patent-winner of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2010 04280; - 13.04.2010 ; publ. 12.07.10. – P 5.
 9. Cherkashina N.I. Competitive sorption lignin drugs for wastewater treatment / N. I. Cherkashina, A. V. Lyubushkina, A. O. Litvinova/ Energy and technology, 2018, V4, No.2. Pp. 109-114.

References

1. Salakavala T. V., Lysenko A. V. Development of the method of sewage treatment from ions of the me-Dee waste of sugar beet production // Collection of scientific papers 4-th International youth scientific conference. In 2 volumes. Executive editor A. A. Gorokhov. 2017. P. 68-71.
2. Demicheva E. S., Laptev A. G. Modeling sorption method of purification of sewage from oil products and heavy metals // Mathematical methods in technics and technologies - mmtt. 2017. Vol. 6. P.81-85.
3. Sucrose A. V., Braslavsky J. V. Water circuits of nuclear power plants: proc. allowance. – Sevastopol: SNUEI, 2013. – 220 p.
4. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistka stochnix vod ot ionov metallov sorbentami iz prirodni [materialov na osnove lignina [Wastewater treatment from metal ions by sorbents

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.

В журнале публикуются результаты исследований по следующим направлениям:

- тепловые и ядерные энергетические установки;
- электротехнические комплексы и сети;
- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- 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.

Принимаются статьи на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована и содержать:

- постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

К статье должно прилагаться:

- два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, первый экземпляр, подписанный всеми авторами;
- оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
- рецензия, подписанная доктором наук или кандидатом наук;
- информация об авторах статьи (заголовки статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты);
- компакт-диск с текстовым файлом.

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

При подготовке статьи в журнал авторы должны руководствоваться стандартом «Оригиналы авторские и текстовые издательские» (ОСТ 29.115—88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования.

Статья должна содержать:

- шифр УДК; название статьи; инициалы и фамилии авторов;
- место работы каждого автора с полным почтовым адресом;
- аннотацию на русском языке (4-5 строк), отображающую цель проведенных исследований и основные результаты;
- ключевые слова;
- индекс UDC (УДК для англ. блока);
- заглавие (на английском языке);
- фамилии и инициалы авторов (на английском языке);

- место работы каждого автора с полным почтовым адресом (на английском);
- аннотация на английском языке с заголовком «Abstract»;
- ключевые слова (на английском языке, соответствующие русскоязычному набору);
- статья на языке оригинала;
- список литературных источников на русском языке (6-20 ссылок);
- список литературных источников на латинице: тот же список, что и в статье, но с транслитерацией фамилий и слов, записанных по-русски, и с переводом на английский язык неанглоязычных названий источников).

ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ

Статья должна представляться также в электронном виде файлом, подготовленном в текстовом процессоре MS Word в режиме разметки страницы. Файл следует сохранять с расширением *.doc(или *.rtf) без макросов.

Имя файла должно начинаться фамилией контактирующего автора на латинице. Основной текст набирается шрифтом «Times New Roman» (11 пт) через интервал с автоматической расстановкой переносов в две колонки с расстоянием между ними 10 мм.

Ширины верхнего поля – 27 мм, нижнего – 23 мм, левого и правого – 18 мм, первый ряд — отступ 0,75 см.

Название статьи – шрифт 16 пт, ФИО – шрифт 14 пт. Сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, список литературы – шрифт 10 пт.

Рисунки выполняются в графических редакторах и (или) процессорах (Paint, PhotoShop, CorelDraw и т.п.) в с разрешением 300dpi.

Шаблон статьи и требования по ее оформлению приведены на сайте СевГУ: <https://www.sevsu.ru/>.

Статьи, не удовлетворяющие шаблону и требованиям к оформлению, рассматриваться не будут.

Более детальную информацию можно получить в редакции журнала:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация. E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru, телефон. +7(8692) 71-01-64.

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 4 № 3**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 4 No 3**

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, А.А. Чуклин*

Подписано к печати 28.09.2018. Изд. № 86/18. Зак. 56/18. Тираж 65 экз.
Объем 12,5 п.л. Усл. печ. л. 11,62. Уч.-изд. л. 12,25. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»