

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. 2 № 3

**Севастополь
2016**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь:
ФГАОУ ВО СевГУ, 2016. – Т. 2. - № 3. – 104 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».

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:

Кирияченко В.А. (главный редактор), к.т.н., профессор;
Омельчук Ю.А. (заместитель главного редактора), к.х.н., доцент;
Федорова С.А. (ответственный секретарь), к.пед.н., доцент;
Сафонов В.А., д.т.н., профессор; *Пухлий В.А.*, д.т.н., профессор;
Пучков В.Н., д.т.н., профессор; *Акимов А.М.*, д.т.н., профессор;
Федоровский К.Ю., д.т.н., профессор; *Олейников А.М.*, д.т.н., профессор;
Тимощенко А.И., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б.*, д.т.н., профессор;
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

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>Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Тригуб М.А.</i> Исследование влияния конструкции и состояния активной зоны реактора на достижение повторной критичности	5
<i>Виноградова Ю.Ю., Рыжов Н. И.</i> Оценка и анализ неопределенностей результатов верификационного расчета по коду СОКРАТ-БН эксперимента Siena с 19-стержневой сборкой	11
<i>Качур С.А.</i> Волновая модель распределения тепловыделения в естественных термоядерных реакторах	17
<i>Качур С.А., Шахова Н.В., Петров С.В., Аникевич К.П., Чуклин А.А.</i> Физическое моделирование тепловыделения в обмотках статора турбогенератора на основе акустического метода	26
<i>Мерзликин Г.Я., Шаповаленко В.В.</i> Оценка отравления ВВЭР-1000 ксеноном по данным теоретических расчетов	31
<i>Свириденко И.И., Шевелев Д.В.</i> Разработка и верификация расчетной модели СПОТ ПГ для РУ АЭС с ВВЭР-1000/В-320	37
Электротехнические комплексы и системы	45
<i>Кувшинов В.В., Какушина Е.Г.</i> Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности	45
<i>Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Васильев А.Д., Горецкий А.А.</i> Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя	51
<i>Шайтор Н.М., Горпинченко А.В.</i> Проблемы подготовки кадров для электроэнергетики Крыма	58
Экологическая безопасность	64
<i>Гавриш В.М., Баранов Г.А., Храброва Е.А., Чайка Т.В., Гавриш О.П.</i> Влияние нанопорошка, полученного из лома твердых сплавов марки ТТК, на эксплуатационные свойства эпоксидного клея	64
<i>Рубцова С.И., Лямина Н.В., Лямин А.Г., Омельчук Ю.А., Кучерик Г.В.</i> К вопросу о показателях экологического состояния прибрежных экосистем	70
Химические технологии атомных станций	81
<i>Замыслова Т.Н., Андреева Е.В., Мирошниченко А.С., Петров С.С., Мороз Н.А.</i> Некоторые особенности воздействия АЭС на окружающую среду	81
<i>Седнев В.А., Мороз Н.А., Замыслова Т. Н., Чупрынин С.А., Костов М.А.</i> Некоторые особенности воздействия АЭС на окружающую среду	89
<i>Черкашина Н.И.</i> Математическая модель процессов очистки технологических сред от радионуклидов и других примесей на АЭС сорбентами на основе лигнина	94
Приглашение	102

CONTENTS

Heating and Nuclear Power Plants	5
<i>Braslavskiy Yu.V., Matuzaev K.B., Trigub M.A.</i> Research of the Reactor Core Construction and Condition Impact on the Recriticality Attainment	5
<i>Vinogradova J.J., Ryzhov N. I.</i> The Uncertainty Quantification and Analysis of the Validation Results of the Siena Experiment with 19-rod Subassembly for the code SOCRAT-BN	11
<i>Kachur S.A.</i> Wave Model of Heat Rate Distribution in Natural Thermonuclear Reactors	17
<i>Kachur S.A., Shakhova N.V., Petrov S.V., Anikevich K.P., Chuklin A.A.</i> Physical Modeling of Heat Rate in the Turbogenerator Stator Winding on the Basis of Acoustic Method	26
<i>Merzlikin G.Ya., Shapovalenko V.V.</i> Assessment toxicity to the VVER-1000 xenon according to the theoretical calculations	31
<i>Sviridenko I.I., Shevelev D.V.</i> Development and verification of the PRHRS SG numerical model for NPP with WWER-1000/V-320	37
Electrotechnical Facilities and Systems	45
<i>Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G.</i> Features enhance power characteristics of solar installations in the development of thermal and electric energy with a receiving surface	45
<i>Kuvshinov V.V., Kakyshina E.G., Vasilev A.D., Goretski A.A.</i> Using thermophotovoltaic plants for heat and electricity to Sevastopol	51
<i>Shaytor N.M., Gorpinchenko A.V.</i> Training problems for power industry of the Crimea	58
Environmental Safety	64
<i>Gavrish V.M., Baranov G.A., Khrabrova E.A., Chayka T.V., Gavrish O.P.</i> The effect of the nanopowder, derived from of TTK brand alloy solid, on the epoxy glue performance properties	64
<i>Rubtsova S.I., Lyamina N.V., Lyamin A.G., Omelchuk Yu.A., Kucherik G.V.</i> About environmental condition indicators of coastal ecosystems	70
Applied Chemistry for Nuclear Power Plants	81
<i>Zamislova T.N., Andreyeva E.V., Miroshnichenko A.S., Petrov S.S., Moroz N.A.</i> Some aspects of the treatment of metal radioactive waste at NPP of the Russian Federation	81
<i>Sednev V.A., Moroz N.A., Zamislova T.N., Chuprinin S.A., Kostov M.A.</i> Peculiarities of nuclear power plant influence on the environment	89
<i>Cherkashina N.I.</i> A mathematical model of the processes of purification of process media from radionuclides and other impurities in NPP sorbents based on lignin	94
Invitation	102

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК.621.039.586

Исследование влияния конструкции и состояния активной зоны реактора на достижение повторной критичности

Ю. В. Браславский¹, К. Б. Матузаев², М. А. Тригуб³

ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул. Университетская 33, г. Севастополь, 299053, Россия.

¹a1a67@yandex.ru, ²matuzaev@mail.ru, ³NatsymeGey@mail.ru

Статья поступила 03.08.2016 г.; после доработки 10.08.2016 г.

Аннотация

При проектировании и эксплуатации водо-водяных реакторов особое внимание уделяется вопросам безопасности ядерной установки. Одним из основных аспектов исследований в этой области является состояние активной зоны реактора при возникновении аварийных ситуаций различного характера. Существенную опасность представляют режимы с резким захлаживанием активной зоны, вызванные неплотностями паропроводов второго контура. Более современные ядерные установки с ВВЭР-1200 имеют повышенный уровень безопасности, позволяющий исключить выделение положительной реактивности даже в условиях запроектных аварий. В статье исследуется возможность достижения реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 повторной критичности в случае разрыва главного паропровода и одновременного неконтролируемого извлечения наиболее ценного органа регулирования из активной зоны. Используются пусковая и стационарная загрузки активной зоны на начало и конец кампании. Определяется наиболее ценный орган регулирования для каждого варианта топливной загрузки. Подтверждается более высокий уровень безопасности ядерной установки с ВВЭР-1200 по сравнению с ВВЭР-1000.

Ключевые слова: водо-водяной реактор, активная зона, повторная критичность, аварийная защита, орган регулирования, топливная загрузка.

Research of the Reactor Core Construction and Condition Impact on the Recriticality Attainment

Yu.V. Braslavskiy¹, K. B. Matuzaev², M.A. Trigub³

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.

¹a1a67@yandex.ru, ²matuzaev@mail.ru, ³NatsymeGey@mail.ru

Received 03.08.2016 y.; received in final form 10.08.2016 y.

Abstract

Special attention is paid to the questions of nuclear installation safety when designing and boiling water reactor operation. One of the main research aspects in this sphere is the reactor core condition when different accidents appear. Quick reactor core cooling modes because of secondary circuit steam pipe leakiness pose major hazard. More modern nuclear installations WWER-1200 have higher safety level which allows to eliminate positive voiding reactivity feedback even in case of beyond-of-design basis accidents. WWER-1000 and WWER-1200 recriticality attainment possibility in case of main steam line break and simultaneous uncontrolled withdrawal of the main regulating unit out of the reactor core is examined in the article. Startup and stationary core inventory is used at the beginning and at the end of fuel life-time. The most important regulating unit for each fuel element column variant is determined. Nuclear installation WWER-1200 higher safety level in comparison of WWER-1000 is confirmed.

Keywords: pressurized water reactor, reactor core, recriticality, reactor safety system, regulating unit, fuel element column.

Введение

При проведении различных анализов безопасности ВВЭР особое место занимают аварии с резким снижением температуры теплоносителя, при котором в активной зоне выделяется дополнительная положительная реактивность. При этом мощность реактора быстро возрастает и возникает опасность перегрева топлива – достижения кризиса теплообмена и перегрева оболочки, плавления и фрагментации топлива. Таким образом, нарушаются критерии, при соблюдении которых реакторная установка может считаться достаточно безопасной при аварийных ситуациях.

Безопасность реактора и всей установки в целом обеспечивается за счет внутренних свойств ядерного топлива, а также действием штатных средств безопасности (аварийной защиты). Внутренними свойствами являются коэффициенты реактивности по топливу и теплоносителю, которые оказывают двойное действие. Негативное воздействие заключается в изначальном выделении положительной реактивности при снижении температуры. Позитивное влияние состоит в последующем создании отрицательной реактивности, которое усиливается по мере повышения мощности и температуры активной зоны. В результате формируется равенство или баланс реактивностей – положительной и отрицательной. В условиях небольших захлаживаний, например, при течи второго контура, такой баланс возникает без нарушения приемочных критериев по топливу. В этих условиях безопасность может обеспечиваться и без срабатывания аварийной защиты (АЗ). В условиях глубокого захлаживания, например, при аварии с разрывом главного паропровода, при достижении баланса реактивностей за счет действия только внутренних свойств приемочные критерии могут нарушаться. Для предотвращения этого включаются средства воздействия на реактивность, прежде всего, АЗ, которая быстро вводит порцию отрицательной реактивности. При наличии большого количества органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) реактор переводится в глубокое подкритическое состояние и остается в нем, несмотря на последующее охлаждение. В случае несрабатывания части из них (например, при неконтролируемом извлечении) реактор может в условиях запроектной аварии выйти из подкритического состояния в так называемую повторную критичность. Это проявляется в некотором повышении мощности реактора.

Сама по себе повторная критичность не опасна, а также она не является адекватным критерием безопасности. Однако по сложившейся традиции принято считать, что достижение состояния повторной критичности является нарушением требований правил ядерной безопасности к величине эффективности АЗ [1].

Постановка цели и задач научного исследования

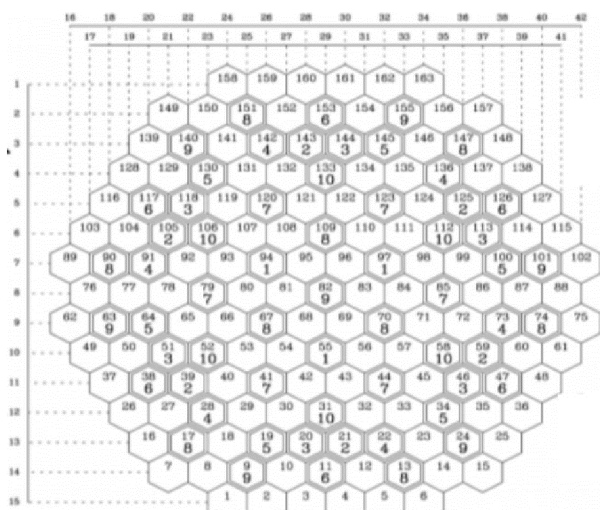
Целью данной работы является определение эффективности влияния внутренних свойств ядерного топлива, аварийной защиты реактора, а также конструкции активной зоны на безопасность ядерной установки. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- используя компьютерную модель ядерной установки, сформировать различные варианты загрузки реакторов ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200;
- для полученных вариантов загрузки активной зоны определить наиболее ценный орган регулирования;
- инициировать аварийную ситуацию с резким захлаживанием активной зоны и неконтролируемым извлечением самого ценного органа регулирования;
- определить факт достижения повторной критичности в указанных условиях.

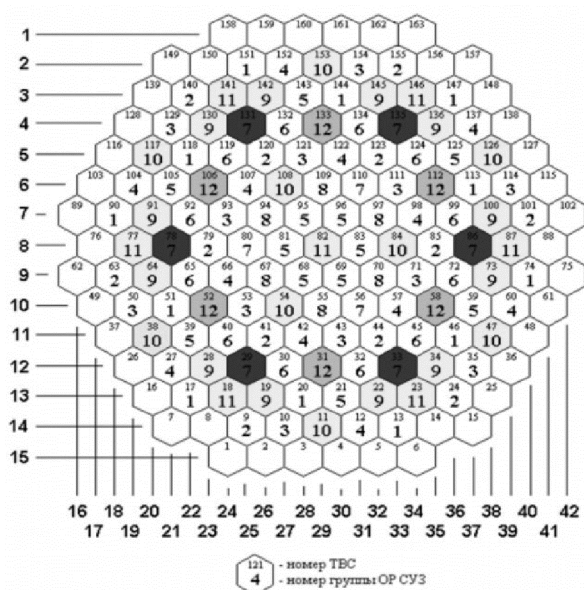
Формирование топливных загрузок ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200

Для проведения исследований использовалась учебно-научная лаборатория «Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ», разработанная коллективом НИЯУ «Московский инженерно-физический институт» с применением интегрированной среды «Эникад», предназначенной для создания программно-аппаратных комплексов полномасштабных компьютерных анализаторов и тренажеров различного класса для атомных и тепловых электростанций. Данная лаборатория используется в Институте ядерной энергии и промышленности Севастопольского государственного университета для проведения учебных занятий и научных исследований. Важным преимуществом лабораторного комплекса является возможность наблюдения параметров, которые в реальности оператором реактора не контролируются, а также моделирования процессов, запрещенных на действующей ядерной энергетической установке.

Реактор ВВЭР-1000 содержит 61 ОР СУЗ (рис. 1, а), вводимых в активную зону под действием собственного веса в случае аварии. Для реактора нового поколения ВВЭР-1200 предусмотрен 121 ОР (рис. 1, б), что делает его более безопасным, в том числе, и в случае серьезных аварий.



а



б

Рис. 1. Расположение ОР СУЗ в активной зоне реактора:
а – ВВЭР-1000; ВВЭР-1200

Первоначально были сформированы следующие варианты активной зоны реактора.

1. ВВЭР-1000 (прототип 3-й блок Калининской АЭС):

- пусковая (первая) загрузка на начало кампании;
- стационарная загрузка на начало кампании;
- пусковая загрузка на конец кампании;
- стационарная загрузка на конец кампании.

2. ВВЭР-1200 (1-й блок Нововоронежской АЭС-2 – проектные данные):

- стационарная загрузка на начало и конец кампании.

Для пусковой топливной загрузки использовались тепловыделяющие сборки (ТВС) со средним обогащением топлива по урану-235 примерно 2,2 % без наличия выгоревшего топлива в зоне на начало работы топливной загрузки.

Для стационарной загрузки использовалось топливо только базовых обогащений топлива подпитки со средним обогащением 4,2...4,7 % с присутствием в зоне в разной степени выгоревшего топлива на начало работы топливной загрузки.

При этом в активной зоне ВВЭР-1000 были расположены 61 ОР, разбитые на 10 групп (рис. 2), а в активной зоне ВВЭР-1200 – 121 ОР, разбитые на 12 групп.



Рис. 2. Фрагмент управления ВВЭР-1000 с указанием положения ОР СУЗ

Определение наиболее ценного органа регулирования СУЗ

На первом этапе исследований для различных топливных загрузок был определен вес самого ценного ОР и его координаты в поперечном плане активной зоны.

Для этого использовалось уравнение переноса нейтронов в некоторой области, содержащей ТВС с урановым топливом (с обогащением

по U^{235} менее 5 %) и замедлитель (воду) в диффузионном и одно групповом приближении [2]:

$$-\nabla D \nabla \varphi + \Sigma_c \varphi - \frac{\nu \Sigma_f \varphi}{K_{eff}} = 0,$$

где φ – собственная функция однородного уравнения

$$\frac{1}{K_{eff}} - \text{минимальное собственное число од-}$$

нородного уравнения.

Отсюда

$$\begin{aligned} Q &= \nu \Sigma_f \varphi, \quad \nabla D \nabla \varphi + \rho_\infty Q = \rho_{eff} Q; \\ \nabla(D + \tilde{D}) \nabla(\varphi_0 + \tilde{\varphi}) + \rho_\infty(Q_0 + \tilde{Q}) &= \\ = (\rho_{eff} + \tilde{\rho}_{eff})(Q_0 + \tilde{Q}), \quad x, y, z \in V - \Delta V; \\ \nabla(D + \tilde{D}) \nabla(\varphi_0 + \tilde{\varphi}) + (\rho_\infty + \tilde{\rho}_\infty)(Q_0 + \tilde{Q}) &= \\ = (\rho_{eff} + \tilde{\rho}_{eff})(Q_0 + \tilde{Q}), \quad x, y, z \in \Delta V; \\ \int_{V-\Delta V} \varphi_0 (\nabla D \nabla(\varphi_0 + \tilde{\varphi}) + \rho_\infty(Q_0 + \tilde{Q}) - & \\ - (\rho_{eff} + \tilde{\rho}_{eff})(Q_0 + \tilde{Q})) dV + \int_{\Delta V} \varphi_0 (\nabla(D + \tilde{D}) \nabla(\varphi_0 + \tilde{\varphi}) + & \\ + (\rho_\infty + \tilde{\rho}_\infty)(Q_0 + \tilde{Q}) - (\rho_{eff} + \tilde{\rho}_{eff})(Q_0 + \tilde{Q})) dV = & \\ = \int_{V-\Delta V} (\varphi_0 + \tilde{\varphi}) (\nabla D \nabla \varphi_0 + \rho_\infty Q_0 - (\rho_{eff} + \tilde{\rho}_{eff}) Q_0) dV + & \\ + \int_{\Delta V} (\varphi_0 + \tilde{\varphi}) (\nabla(D + \tilde{D}) \nabla \varphi_0 + (\rho_\infty + \tilde{\rho}_\infty) Q_0 - & \\ - (\rho_{eff} + \tilde{\rho}_{eff}) Q_0) dV = \tilde{\rho}_{eff} \int_V Q_0 Q_c \frac{dV}{\nu \Sigma_f} = & \\ = \int_{\Delta V} \tilde{\rho}_\infty Q_0 Q_c \frac{dV}{\nu \Sigma_f} + \int_{\Delta V} Q_c \nabla \tilde{D} \nabla \varphi_0 \frac{dV}{\nu \Sigma_f} = & \\ = \int_{\Delta V} \tilde{\rho}_\infty Q_0 Q_c \frac{dV}{\nu \Sigma_f} + \int_{\Delta V} \frac{\tilde{D}}{D} (\rho_{eff} - \rho_\infty) Q_0 Q_c \frac{dV}{\nu \Sigma_f} = & \\ \int_{\Delta V} Q_0 Q_c \left(\frac{1}{K_\infty^0} - \frac{1}{K_\infty^c} + \frac{\tilde{D}}{D} \left(\frac{1}{K_\infty^0} - \frac{1}{K_{eff0}^0} \right) \right) \frac{dV}{\nu \Sigma_f} \approx & \\ \approx \int_{\Delta V} Q_0 Q_c \left(\frac{1}{K_\infty^0} - \frac{1}{K_\infty^c} \right) \frac{dV}{\nu \Sigma_f}, \quad \text{т.к. для ВВЭР} & \\ \left| \frac{1}{K_\infty^0} - \frac{1}{K_\infty^c} \right| >> \left| \frac{\tilde{D}}{D} \left(\frac{1}{K_\infty^0} - \frac{1}{K_{eff0}^0} \right) \right|, & \end{aligned}$$

где Q_0 – распределение числа делений по объему зоны при выброшенном ОР;

Q_c – распределение числа делений по объему зоны при всех ОР на НКВ;

K_{eff0} – эффективный коэффициент размножения при всех ОР на НКВ;

K_∞^c – эффективный коэффициент размножения бесконечной решетки в ТВС с ОР СУЗ;

K_∞^0 – эффективный коэффициент размножения бесконечной решетки в ТВС без ОР СУЗ.

Следовательно,

$$\rho_{эфф} = \frac{\int_{\Delta V} Q_0 Q_c \left(\frac{1}{K_\infty^0} - \frac{1}{K_\infty^c} \right) \frac{dV}{\nu \Sigma_f}}{\int_V Q_0 Q_c \frac{dV}{\nu \Sigma_f}}. \quad (1)$$

Таким образом, выражение (1) показывает, что вес одиночного органа регулирования определяется, в основном, по следующим параметрам:

- относительной доле числа делений в ТВС, из которой он был извлечен;
- изменению размножающих свойств в данной ТВС.

Проверка достижения повторной критичности

На втором этапе была смоделирована аварийная ситуация, вызывающая резкое захлаживание активной зоны реактора и срабатывание аварийной защиты. При этом было наложено консервативное условие, согласно которому происходило неконтролируемое извлечение наиболее ценного ОР из активной зоны, связанное, например, с отказами в автоматических цепях управления (рис. 3).



Рис. 3. Неконтролируемое извлечение наиболее ценного ОР СУЗ из активной зоны

При проведении исследований были определены следующие параметры:

- температура теплоносителя на входе в активную зону;

- подкритичность активной зоны без наиболее ценного ОР.

Кроме того, были построены соответствующие зависимости, позволяющие определить факт достижения повторной критичности и температуру повторной критичности (рис. 4-6). Эта температура определялась как значение, при котором реактивность реактора становится больше $-0,01$ (-1%) в «горячем» состоянии активной зоны без мощности, а также при концентрации борной кислоты и распределении концентрации ксенона, соответствующим состоянию реактора на номинальной мощности.

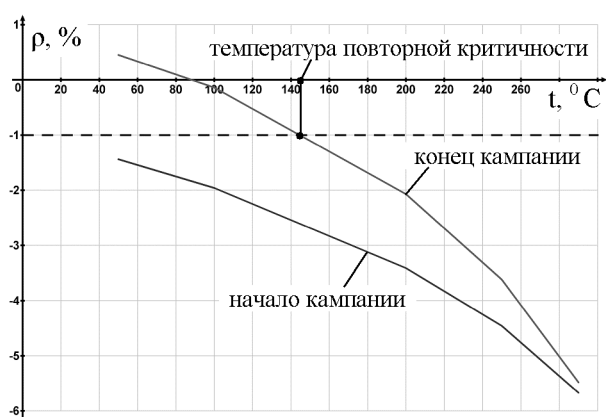


Рис. 4. Пусковая загрузка ВВЭР-1000

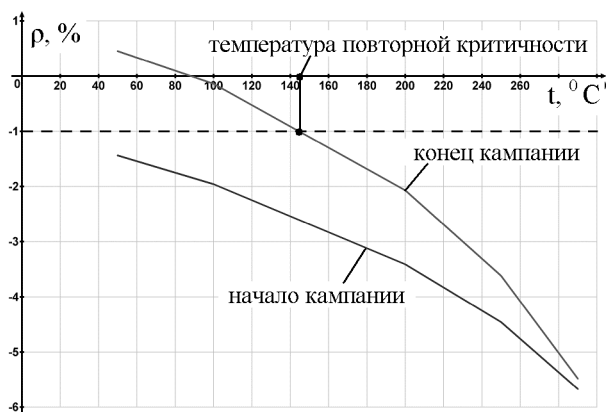


Рис. 5. Стационарная загрузка ВВЭР-1000

В ходе проведенных исследований были получены следующие результаты:

- повторная критичность была достигнута в активной зоне ВВЭР-1000 на конец кампании при пусковой и стационарной загрузках. При этом температура повторной критичности составила 145 и $165\text{ }^{\circ}\text{C}$, соответственно;

- в активной зоне ВВЭР-1200 повторная критичность достигнута не была.

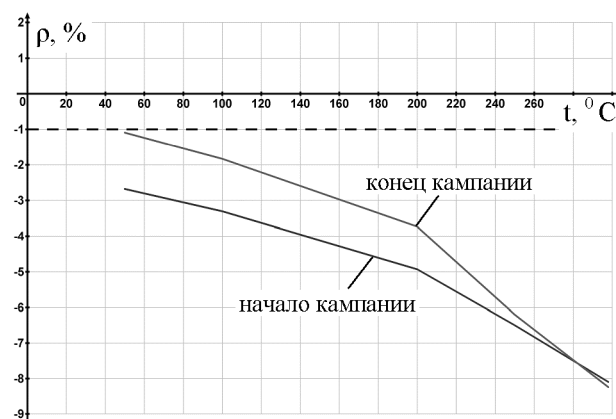


Рис 6. Стационарная загрузка ВВЭР-1200

Достижение повторной критичности в конце кампании обуславливается определяющим влиянием на данное явление температурного эффекта реактивности, который достигает максимальных значений в конце кампании, когда концентрация борной кислоты в теплоносителе близка к нулю.

Таким образом, срабатывание аварийной защиты ВВЭР-1200 исключает явление повторной критичности в активной зоне реактора даже в случае запроектных аварий, что подтверждает более высокий уровень безопасности ядерной установки с ВВЭР-1200 в сравнении с ВВЭР-1000.

Заключение

Проведенные исследования по определению возможности достижения повторной критичности в активной зоне ВВЭР-1000 и ВВЭР-1200 при различных вариантах топливных загрузок показали следующие результаты:

- вес одиночного органа регулирования определяется, в основном, по следующим параметрам: относительной доле числа делений в ТВС, из которой он был извлечен, а также изменению размножающих свойств в данной ТВС;
- глубокое захлаживание активной зоны в результате разрыва паропровода второго контура вызывает некоторое повышение мощности реактора;
- в этом случае при неконтролируемом извлечении наиболее ценного ОР СУЗ повторная критичность достигается в активной зоне ВВЭР-1000 на конец кампании при пусковой и стационарной загрузках. В активной зоне ВВЭР-1200 повторная критичность не достигается;

- аварийная защита ВВЭР-1200 исключает явление повторной критичности в активной зоне реактора даже в случае запроектных аварий, что подтверждает более высокий уровень безопасности ядерной установки с ВВЭР-1200 в сравнении с ВВЭР-1000.

Список литературы

1. Пономаренко Г.Л. Использование метода ВЕРУ для исследования запроектных аварийных режимов с захолаживанием в ВВЭР-1000 / Г.Л. Пономаренко, М.А. Быков, А.М. Москалев // Вопросы атомной науки и техники. – Подольск, 2009. – Вып. 25. – С. 78 – 95.
2. Выговский С.Б. Физические и конструкционные особенности ядерных энергетических установок с ВВЭР / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, А.А. Семенов, Е.В. Чернов, Л.Н. Богачек. – М.: НИЯУ МИФИ, 2011. – 376 с.
3. Выговский С.Б. Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, Е.В. Чернов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 304 с.

References

1. Ponomarenko G.L., Bykov M.A., Moskaev A.M. Water-boiling reactor, reactor core, recriticality, reactor safety system, regulating unit, fuel element column. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. Podolsk Publ., 2009, Issue 25, pp 78-95.
2. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek. *Fizicheskie i konstruktivnyye osobennosti yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [WWER nuclear installations physical and specific design features]. Moscow, NIYAU MEPhI Publ., 2011, 376 p.
3. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Chernov E.V. *Bezopasnost i zadachi inzhenernoy podderzhki ekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [Safety and issues of the WWER nuclear installation operation engineer assistance]. Moscow, NIYAU MEPhI Publ., 2013, 304 p.

УДК 621.039.534

Оценка и анализ неопределенностей результатов верификационного расчета по коду СОКРАТ-БН эксперимента Siena с 19-стержневой сборкой

Ю.Ю. Виноградова, Н. И. Рыжов

ИБРАЭ РАН, Москва, 115191, РФ, Vinogradova@ibrae.ac.ru

Статья поступила 07.09.2016 г.; после доработки 16.09.2016 г.

Аннотация

Для решения актуальных задач в области обоснования безопасности АЭС с РУ БН, в том числе анализа аварий с разрушением активной зоны реактора в ИБРАЭ РАН был разработан интегральный код СОКРАТ-БН. Для комплексного расчета такой аварии в коде СОКРАТ-БН используется мультифизический подход. В расчете применяются одномерная и двухмерная модели теплогидравлики, модель точечной кинетики для нейтронно-физического расчета реактивной зоны, модель плавления топливных сборок, модели наработки и распространения ПД в теплоносителе и реакторных помещениях, модель для расчета термомеханических напряжений в оболочках топливных стержней. Каждая модель, реализованная в коде, требует верификации, для обоснования её применимости к моделированию исследуемых явлений. Только после верификации всех используемых моделей, расчетный код может использоваться для проведения расчетов для обоснования безопасности АЭС.

В настоящей работе приведена количественная оценка результатов верификации одномерной теплогидравлической модели в составе кода СОКРАТ-БН на эксперименте, моделирующем аварию типа ULOF. Данная работа выполнена в рамках доработки верификационного отчета первой версии кода СОКРАТ-БН. При проведении верификации исследуется сходимость данного расчета по сетке. Методом варьирования входных параметров расчета исследуется их влияние на результаты численного моделирования.

Ключевые слова: быстрый реактор, теплогидравлика, верификация, анализ неопределенностей

The Uncertainty Quantification and Analysis of the Validation Results of the Siena Experiment with 19-rod Subassembly for the code SOCRAT-BN

J. J. Vinogradova, N. I. Ryzhov

Nuclear Safety Institute of Russian Academy of Science, Moscow,
st. Bol'shaja Tul'skaja, 52, 115191, Russia, Vinogradova@ibrae.ac.ru

Received 07.09.2016 y.; received in final form 16.09.2016 y.

Abstract

To solve actual problems in the area of safety analyses of sodium-cooled fast reactors (SFRs) including accidents with core melt down IBRAE RAS developed SOCRAT-BN code system. To provide complex simulation of such accidents a coupled analysis approach realized in SOCRAT-BN. The code includes one- and two-dimensional thermal-hydraulic models, point kinetics model for the neutron-physical simulation of the core, core melt down model, model of accumulation and transfer of fission products in coolant and NPP premises, model of strain-stresses behavior of the shells of the fuel rods. Each model implemented in the code requires validation to justify its applicability to the modeling of the studied phenomena. Only after validation of the models, the simulation code can be used to perform calculations to justify NPP safety.

The present study shows quantitative assessment of the validation results of one-dimensional thermal-hydraulic model in code SOCRAT-BN on the experiment simulating ULOF type of accident. This work was performed as part of the validation report completion of the first version of the code SOCRAT-BN. During the validation the grid-refinement study is

carried out. The method of variation of input parameters of simulation is used to investigate its influence on the simulation results.

Key words: fast reactor, accident, thermal-hydraulics, validation, uncertainty analysis, assessment

1. Введение

Верификация кода на экспериментальных данных позволяет дать ответ на вопрос насколько близко, модели, заложенные в коде, описывают наблюдаемые физические явления. Для количественной оценки результатов верификации кода, необходимо оценить близость результатов расчета кода и статистических данных эксперимента или результатов другого кода с учетом их неопределенностей. Источником неопределенностей является неполнота информации о моделируемом объекте, неадекватность математической модели и несовершенство расчетных методик.

Верификация кода на экспериментальных данных начинается с верификации численного решения, полученного для модели экспериментальной установки. При численном решении системы нелинейных дифференциальных уравнений в совокупности с замыкающими соотношениями неизбежно возникает неопределенность в результатах расчета связанная с линеаризацией, аппроксимацией, ошибками округления и усреднения. Таким образом, численное решение системы уравнений отличается от точного решения. В работе используется способ оценки данной неопределенности результатов расчета с использованием только двух расчетных сеток с разным количеством ячеек. Также неопределенность результатов расчета возникает из-за неопределенности в условиях проведения эксперимента и других входных данных.

По результатам проведенных расчетов получены доверительные интервалы для величины расхождения расчета с экспериментом, связанного с модельными представлениями о протекающих физических процессах.

2. Описание методики количественной оценки

Для количественной оценки результатов верификации была использована методика, описанная в [3]. В методике большое внимание уделяется учету неопределенностей результатов расчета. При сравнении с экспериментом также учитывается неопределенность эксперимен-

тальных данных. Далее приведено краткое описание использованной методики.

В [4] показано, что расхождение расчетных и экспериментальных данных связано с:

- допущениями, сделанными в физических моделях, заложенных в коде δ_{model} ;
- расхождениями в условиях проведения эксперимента и условиях в расчете δ_{input} ;
- ошибкой численного решения системы дифференциальных уравнений δ_{num} ;
- расхождением результатов измерений и истинного значения измеряемой величины δ_D .

В конечной формуле расхождение расчетных и экспериментальных данных E записывается в виде [4]:

$$E = \delta_{model} + \delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D. \quad (1)$$

Целью верификации кода [3] является определение доверительного интервала $(E - u_{ver}; E + u_{ver})$ для расхождения, связанного с упрощениями в физических моделях, заложенных в коде, δ_{model} .

$$\delta_{model} = E - (\delta_{input} + \delta_{num} - \delta_D). \quad (2)$$

Точные значения в правой части определить невозможно, поэтому говорят о неопределенностях (стандартном отклонении).

$$u_{ver}^2 = u_{input}^2 + u_{num}^2 + u_D^2. \quad (3)$$

Неопределенность u_D является неопределенностью экспериментальных данных, с которыми проводится сравнение. Неопределенность u_{num} определяется из расчетов по сеткам с различным разбиением [5]. Эти расчеты также позволяют показать сеточную сходимость полученного решения. Неопределенность u_{input} находится с помощью проведения многовариантных расчетов. Варьируются граничные условия проведения эксперимента, коэффициенты замыкающих соотношений, геометрические параметры экспериментальной установки. Полученные результаты статистически обрабатываются для определения

среднего E . Дисперсия же будет соответствовать u_{input} .

3. Описание эксперимента

Для верификации были использованы экспериментальные данные, полученные на установке Siena (Япония). В японском исследовательском центре O-arai Engineering Center была проведена серия экспериментов на натриевой петле с 19-стержневой сборкой [2].

В ходе эксперимента исследовался переходной режим с кипением натрия. Данный режим реализовывался в условиях потери циркуляции теплоносителя, когда электрический обогрев оставался постоянным, а расход насоса линейно уменьшался. Параметры испытательного пучка были приближены к японскому реактору MONJU.

Макет сборки состоял из 19 электрически обогреваемых стержней с внешним диаметром 6,5 мм, они были расположены в треугольной решетке с шагом 7,9 мм. Сборка была заключена в шестигранный кожух размером 36,7 мм «под ключ», который, в свою очередь, был окружен теплоизоляцией с дополнительным обогревом, для обеспечения адиабатических граничных условий. Профиль энерговыделения был однородным по радиусу. Средний тепловой поток в теплоноситель равнялся 150 Вт/см^2 . На рис.1 приведено схематичное изображение рабочего участка установки с 19-стержневой сборкой. Поток натрия в сборку подавался насосом снизу, на входе в сборку поток разворачивался и продолжал движение вертикально вверх. Температура втекающего в сборку натрия равнялась 366°C .

Выходя из сборки поток натрия поворачивал в расширительный бак, где смешивался с натрием из байпасных каналов. Из расширительного бака натрий поступал в теплообменник, а затем на всас насоса.

Геометрические параметры сборки собраны в таблице 1. Имитаторы твэл состояли из входного необогреваемого участка, обогреваемого участка длиной 465 мм и выходного необогреваемого участка.

Для измерения температуры теплоносителя в сборке были установлены 3 термодатчика на выходе из обогреваемого участка, рис. 2.

Таблица 1. Геометрические параметры 19-стержневой сборки.

Общая длина стержней, мм	1515
Длина входного участка, мм	465
Длина обогреваемого участка, мм	700
Длина выходного участка, мм	350
Диаметр стержня, мм	6,5
Шаг треугольной решетки, мм	7,9
Внутренний размер шестигранного кожуха, мм	36,7
Профиль энерговыделения	однородный

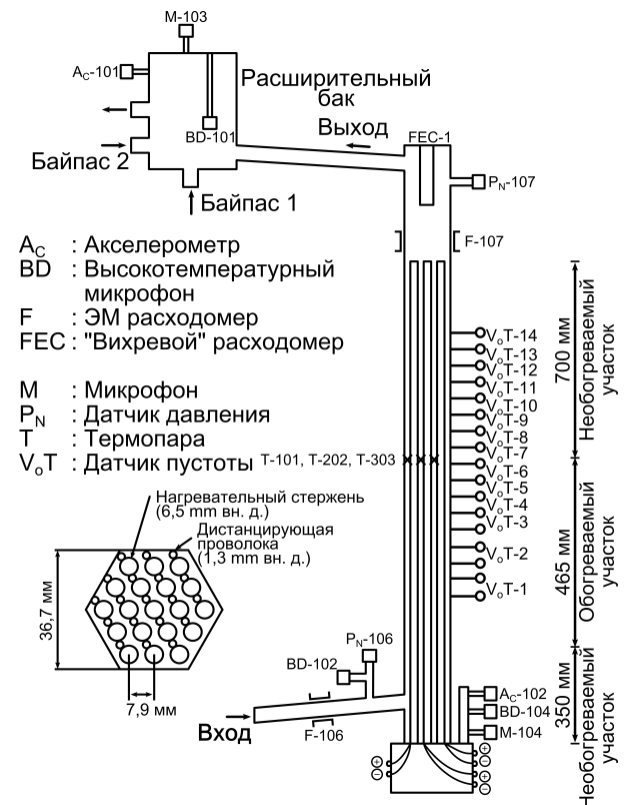


Рис. 1. Схема рабочего участка с 19-стержневой сборкой экспериментальной установки Siena.



Рис. 2. Расположение термодатчиков в 19-стержневой сборке.

4. Описание модели эксперимента

Для моделирования эксперимента было разработано 3 нодализационных схемы с различным разбиением (рис. 3 б, в, г). Коэффициент измельчения сетки 2 $r_{12} = 3.03$, для сетки 3 $r_{13} = 5.06$. Сборка моделировалась параллельными одномерными каналами. На рис. 3д приведено представление расчетных сеток в структурных элементах кода СОКРАТ-БН. Разделение потоков теплоносителя на входе в сборку и их слияние на выходе из сборки было реализо-

вано с помощью гидравлического элемента «камера».

В данных расчетах модель имитатора содержала танталовый сердечник (рис. 3а), мощность энерговыделения в котором уменьшалась с температурой.

Выходной бак моделировался граничным условием на постоянное давление. Насос моделировался граничным условием по давлению, которое менялось со временем [6].

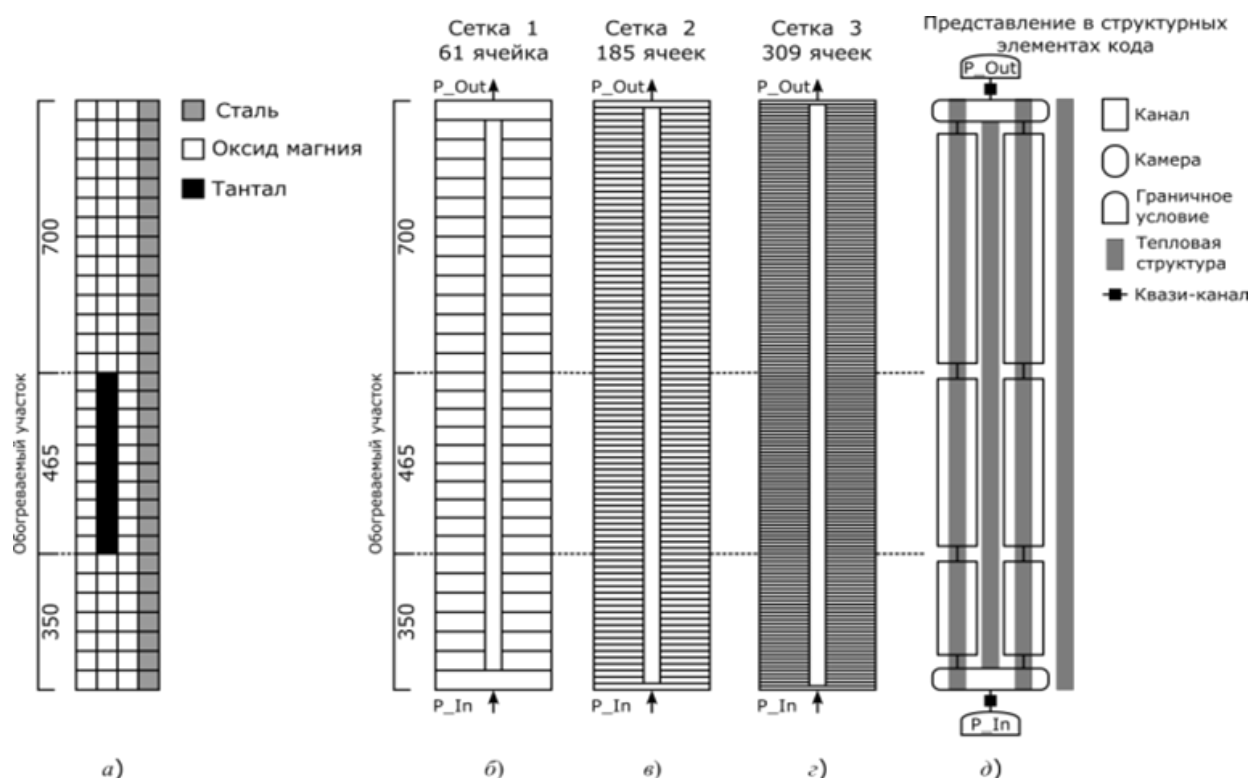


Рис. 3. Нодализационные схемы.

5. Результаты верификации

На рис. 4 приведена скорость теплоносителя на входе в сборку. Видно, что в расчете по самой грубой сетке скорость теплоносителя упала сильнее всего. На рис. 5 приведены температуры теплоносителя на выходе из обогреваемого участка. В однофазном режиме течения, до вскипания рассчитанные на разных сетках температуры теплоносителя практически не различаются. При вскипании теплоносителя и после отключения мощности из общего поведения температуры выделяется расчет по самой грубой сетке. Малая разница между скоростями и температурами, рассчитанными по сетке 2 и сетке 3,

говорит о хорошей сходимости расчетов по коду СОКРАТ-БН.

В таблице 2 приведены моменты вскипания теплоносителя при выбеге насоса и моменты окончания кипения теплоносителя после отключения мощности нагревателей на 17 с. от начала выбега насоса. Видно, что при измельчении сетки расчетные моменты времени приближаются к экспериментальным значениям.

В данном тесте были приняты неопределенности входных данных, при которых были проведены многовариантные расчеты с использованием кода VARIA [7]. Было принято, что входные параметры имеют нормальное распределе-

ние. Всего было выполнено 150 расчетов для набора статистики. На рис. 6 приведены результаты многовариантных расчетов, вертикальными линиями обозначены интервалы 2δ .

В таблице 3 приведены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных. В оригинальной статье [2] не указана погрешность измерения температуры теплоносителя, поэтому консервативно было принято, что неопределенность измерения температуры равняется 5K с учетом неопределенности установки термопар. Рассчитанная температура теплоносителя в центральной части сборки сравнивалась со средней температурой термопар T-101 и T-202. Температура теплоносителя во втором кольце сравнивалась с термопарой T-303. Видно, что для этой термопары расхождение с экспериментом больше, чем для центральной части сборки. Это связано с недостаточностью информации о граничных условиях на внешней стенке кожуха сборки.

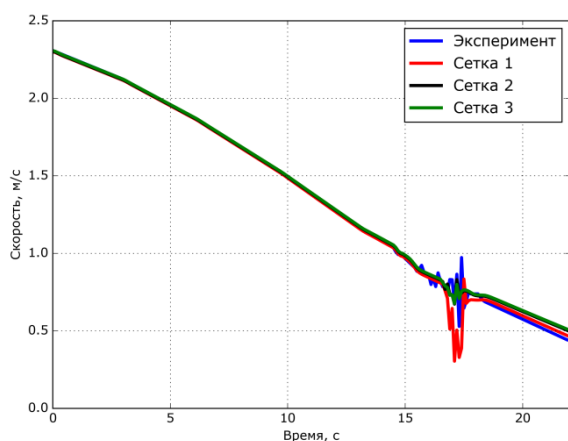


Рис. 4. Скорость на входе.

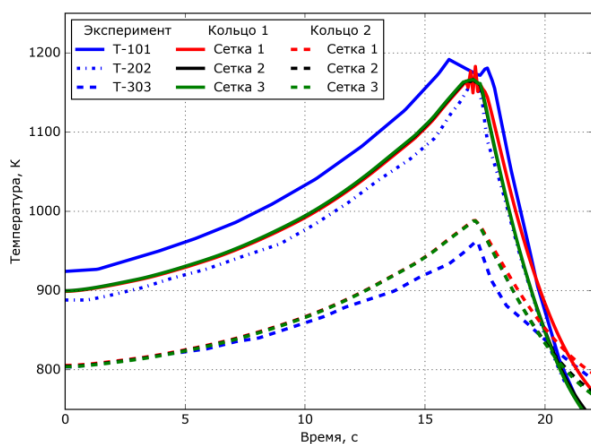


Рис. 5. Температура на выходе.

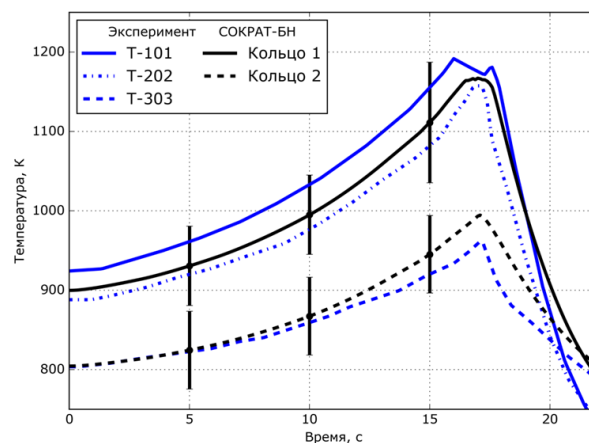


Рис. 6. Многовариантные расчеты.

Таблица 2. Характерные события.

Событие	Эксперимент	Расчет		
		Сетка 1	Сетка 2	Сетка 3
Время вскипания, с	15,40	16,66	16,60	16,55
Время окончания кипения, с	17,20	17,40	17,35	17,31

Таблица 3. Результаты сравнения.

Положение термопар	Кольцо 1 (T-101, T-202)		Кольцо 2 (T-303)
Режим течения	1 фаза, К	2 фазы, К	1 фаза, К
E, K	3,9	15,8	9,7
u_{num}, K	0,7	6,7	0,1
u_{input}, K	25,4	38,1	24,5
u_D, K	5,0	5,0	5,0
u_{ver}, K	26,0	39,0	25,3

6. Заключение

В рамках верификации кода СОКРАТ-БН проведены расчеты данного эксперимента по методике ASME с учетом неопределенностей. Основной вклад в конечную неопределенность сравнения расчетных данных с экспериментальными вносит неопределенность во входных данных. При проведении расчетов насос моделировался граничным условием по давлению и было учтено изменение мощности электрических имитаторов с изменением температуры. По расчетам на разных сетках показана сходимость результатов.

Список литературы

1. Ртищев Н.А., Чалый Р.В., Тарасов А.Е., Семёнов В.Н., Бутов А.А., Вожаков И.С., Жигач С.А., Кудашов И.Г., Усов Э.В., Прибатурин Н.А. Разработка кода СОКРАТ-БН. МНТК НИКИЭТ, 2012. Сборник докладов. С. 348-359.
2. Y. Kikuchi, K. Haga, "Sodium boiling experiments in a 19-pin bundle under loss-of-flow conditions", Nuclear Engineering and Design 66, 1981. – P. 357-366.
3. Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, V&V20-2009.- New York: ASME, 2009.
4. H.W. Coleman and W.G. Steele, Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. ISBN 978-0-470-16888-2.
5. W.L. Oberkampf and C.J. Roy, Verification and Validation in Scientific Computing, Cambridge: Cambridge University Press, 2010. ISBN 978-0-521-11360-1.
6. Рыжов Н.И., Виноградова Ю.Ю., Верификация двухмерной теплогидравлической модели в составе кода СОКРАТ-БН на эксперименте Siena-19, ШМУ XVI, сборник трудов, 2015. С. 128-131.
7. Moiseenko E. V., Filippov A. S. A methodology for multivariate simulation with massively parallel computing systems for NPP safety assessment: VARIA code – J. of Eng. Thermophysics – 2011 – Vol.20/3 – P. 249 – 259.
- School of NSI RAS Young Scientists], Moscow, NSI RAS, 2015, pp. 128-131.
7. Moiseenko E.V., Filippov A.S. A Methodology for Multivariate Simulation with Massively Parallel Computing Systems for NPP Safety Assessment: VARIA code, J. of Eng. Thermophysics, 2011, Vol.20/3, pp. 249-259.

References

1. Rtischev N.A., Chalyy R.V., Tarasov A.E., Semenov V. N., Butov A.A., Vozhakov I.S., Jigach S.A., Kudashov I.G., Usov E.V., Pribaturin N.A. The Development of Code SOCRAT-BN. MNTK NIKIET "Sbornik dokladov" [Proc. of the MNTK NIKIET], Moscow, NIKIET, 2012, pp. 348-359.
2. Kikuchi Y., Haga K., Sodium Boiling Experiments in a 19-pin Bundle under Loss-of-Flow Conditions, Journal Nuclear Engineering and Design, 1981, Vol. 66, pp. 357-366.
3. The American Society of Mechanical Engineers, Standard for Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer, New York, ASME, 2009, 87 p.
4. Coleman H.W., Steele W.G., Experimentation, Validation, and Uncertainty Analysis for Engineers, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2009, 317 p. ISBN 978-0-470-16888-2.
5. Oberkampf W.L., Roy C.J., Verification and Validation in Scientific Computing, Cambridge, Cambridge University Press, 2010, 767 p. ISBN 978-0-521-11360-1.
6. Ryzhov N.I., Vinogradova J.J., Validation of Two-dimensional Thermo Hydraulic Model in code SOCRAT-BN on the Siena-19 Experiment. SHMU XVI, "Sbornik trudov" [Proc. of the XVI Scientific

УДК 621.039.56

Волновая модель распределения тепловыделения в естественных термоядерных реакторах

С.А. Качур

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

Статья поступила 06.09.2016 г.; после доработки 09.09.2016 г.

Аннотация

Дана новая звездная модель, основанная на волновых процессах распределения энергии термоядерных реакций в недрах звезды. Предложено решение проблемы солнечных нейтрино. Результаты исследования определяют новые возможности для изучения динамики звезд и открывают новые перспективы реализации управления термоядерными реакторами в земных условиях.

Ключевые слова: естественный термоядерный реактор, звездная модель, тепловыделение, гравитационная волна, имитационное моделирование.

Wave Model of Heat Rate Distribution in Natural Thermonuclear Reactors

S.A. Kachur

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

Received 06.09.2016 y; received in final form 09.09.2016 y

Abstract

A new star model based on the waving processes of distributing of thermonuclear reactions energy in star earth bowels is given. Solution of the sun neutrinos problem is offered. Research results determine new possibilities for the study of dynamics of stars and open new prospects of realization of control by thermonuclear reactors in earthly conditions.

Keywords: natural thermonuclear reactor, star model, heat rate, gravitation wave, simulation.

Введение

В настоящее время существует несколько фундаментальных источников энергии, которые могут быть освоены и использованы человечеством. Одним из таких источников энергии являются ядерные реакции синтеза. В реакциях синтеза энергия производится за счет работы ядерных сил, совершаемых при слиянии ядер легких элементов и образовании более тяжелых ядер. Такого типа реакции широко распространены в природе. Считается, что энергия звезд и, в том

числе, Солнца производится в результате цепочки ядерных реакций синтеза, превращающих четыре ядра атома водорода в ядро гелия. Солнце – это большой естественный термоядерный реактор, снабжающий энергией экологическую систему Земли.

Изучение Солнца как источника термоядерной энергии потребовало разработки модели структуры и механизма управления ядерными реакциями в недрах звезды. Стандартная модель Солнца [1] хорошо описывает экспериментальные результаты, но зависит от многих парамет-

ров, для получения которых необходимо прямое зондирование Солнца. Наиболее веским доказательством справедливости этой модели явилось бы прямое наблюдение солнечных нейтрино. Однако рассчитанный по модели поток нейтрино от Солнца в три раза превышает результаты экспериментов. Кроме того, незначительное уменьшение температуры в центре звезды приводит к несоответствию реальности Стандартной модели Солнца.

В связи с новыми исследованиями гравитационного излучения звезд актуальным является разработка новых звездных моделей, в которых перенос энергии осуществляется гравитационными волнами.

Проблемы гравитационного излучения, его скорости, взаимодействия с веществом, взаимных превращений гравитационного поля и обычной материи, роли волн во Вселенной относятся к важнейшим в современной теории гравитации. Сложность вопроса усугубляется отсутствием полностью удовлетворительного определения энергии гравитационного поля [2].

Кроме того, исследование возможности управления термоядерными реакциями посредством волнового излучения открывает новые перспективы для решения проблем управляемого термоядерного синтеза.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – создание модели тепловыделения звезд и Солнца на основе механизма переноса энергии гравитационными волнами.

Для достижения поставленной цели необходимо: 1) произвести анализ звездных моделей и определить возможность создания принципиально новых моделей; 2) разработать простую и наглядную звездную модель, описывающую распределение тепловыделения и процесс переноса энергии при сохранении целостности звезды.

Анализ моделей Солнца и звезд

Под «звездной моделью» понимается совокупность таблиц (или графиков), дающих «идеализированное» распределение плотности, температуры, давления, химического состава вещества звезды для разных глубин, выраженных в долях ее радиуса. Такая модель не тождественна реальной звезде, но может давать в основном верное представление о свойствах вещества звездных недр [1].

Звезды представляют собой газовые шары, целостность которых определяется силой всемирного тяготения, т. е. гравитацией, и противодействующей ей силой давления газа.

Для расчета температуры в центральных областях звезд, исходя из условия гидростатического равновесия

$$P = \frac{4GM\bar{\rho}}{R} \quad (1)$$

и формулы Клапейрона

$$P = \frac{A}{\mu} \rho T, \quad (2)$$

используется следующее соотношение

$$T_{CZ} = \frac{2\bar{\rho}}{\rho_{CZ}} \cdot \frac{MG}{AR}, \quad (3)$$

где P – давление газа; T_{CZ} – температура в центральной области звезды; ρ_{CZ} – плотность в центральной области звезды; $\bar{\rho}$ – средняя плотность звезды (соотношение $\bar{\rho}/\rho_{CZ}$ может иметь порядок 10^{-1}); μ – средняя молекулярная масса; R – радиус звезды; G – гравитационная постоянная; M – масса звезды; A – универсальная газовая постоянная.

Определение центральных температур различных звезд производят, выражая их массы и радиусы в долях солнечной массы и солнечного радиуса,

$$T = T_C \left(\frac{M}{M_C} \right) \left(\frac{R}{R_C} \right) \quad (4)$$

где M – масса звезды; R – радиус звезды; T – температура центральных областей звезды; M_C – масса Солнца; R_C – радиус Солнца; T_C – температура центральных областей Солнца.

Основным источником энергии звезд и Солнца являются термоядерные реакции в их недрах. Для Солнца такой реакцией является протон-протонная реакция. Для более массивных, а, следовательно, и более горячих звезд существенна углеродно-азотная реакция, зависимость которой от температуры значительно более сильная. Если температура звездных недр по каким-либо причинам становится очень большой (порядка сотен миллионов кельвинов), что может случиться после того, как практически весь водород выгорит, источником ядерной энергии становится реакция «тройной альфа-процесс». Вся выделившаяся в недрах звезд ядерная энергия должна покидать звезду; этот процесс определяет светимость звезды.

Термоядерные реакции в звезде происходят с постоянной скоростью. Скорость ядерных реакций определяется температурой, которая согласно формуле Клапейрона регулируется давлением. При нарушении вследствие локального разогрева гидростатического равновесия происходит его быстрое восстановление. Ядерные реакции поддерживают установившийся температурный режим на том уровне, который определяется структурой звезды, обеспечивая ее светимость на определенный интервал времени. Таким образом, звезда, в частности Солнце, является естественным термоядерным реактором.

Известны три основных способа переноса энергии: а) теплопроводность, б) конвекция, в) лучеиспускание. Основным процессом переноса энергии в звездных недрах является лучеиспускание. Поток излучения от звезды, а, следовательно, ее светимость, тем больше, чем меньше непрозрачность звездного вещества и сильнее перепад температуры в звездных недрах. Светимость звезды связана с основными ее характеристиками следующим соотношением

$$L_r = 4\pi r^2 \frac{\sigma T^3}{3\chi\rho} \left(\frac{dT}{dr} \right), \quad (5)$$

где χ – коэффициент поглощения, рассчитанный на единицу массы; dT/dr – изменение температуры при продвижении на один сантиметр от центра звезды; σ – постоянная Стефана-Больцмана; r – произвольно выбранный радиус.

Из-за сложности системы уравнений, описывающих состояние звезд, расчет модели не может быть выполнен аналитически. Идея численного метода расчета модели следующая. Считаются заданными такие основные параметры звезд, как их масса, светимость и радиус. Предполагается, что модель звезды сферически-симметричная, т. е. все характеристики любого элемента ее объема (температура, плотность и т.д.) зависят только от расстояния этого элемента от центра звезды. Тело звезды разделяют на большое количество концентрических сферических слоев. В пределах достаточно тонкого слоя значения указанных характеристик считают постоянными. Условия гидростатического равновесия (1) позволяют найти давление на поверхности первой (самой внутренней) сферы. Пользуясь формулой Клапейрона (2), определяется температура в центре. Затем, зная зависимость скорости ядерного энерговыделения от температуры (рис. 1) и используя уравнение для переноса лучистой энергии (5), получают температуру на поверхности шаровой сферы, и по формуле Клапейрона определяют плотность. Эта проце-

дура позволяет слой за слоем рассчитать модель звезды.

Масса рассчитанной модели получается как результат суммирования масс, заключенных в пределах элементарных сфер. Учитывая величину термоядерной энергии в разных слоях, получают теоретическую светимость звездной модели.

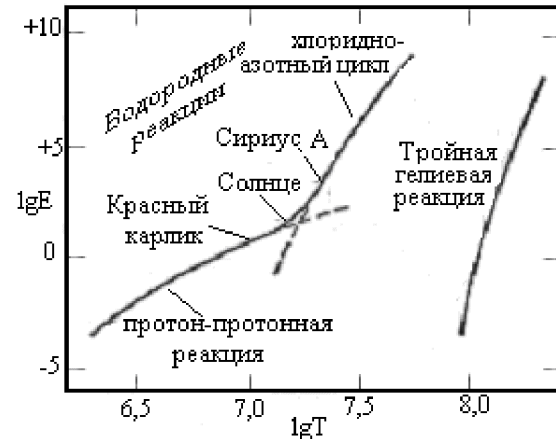


Рис. 1. Зависимость скорости ядерного энерговыделения от температуры для трех реакций.

Особый интерес представляет строение Солнца (рис. 2). Солнце – типичная звезда, которая представляет собой желтый карлик спектрального класса G2. Рассчитано несколько моделей Солнца, отличающихся численными значениями некоторых параметров (прежде всего химического состава).

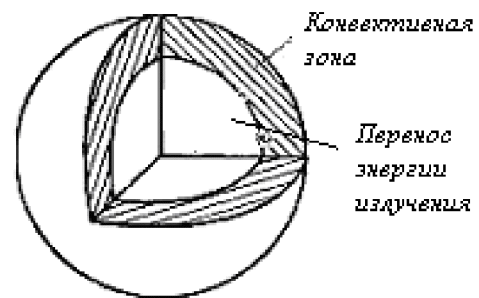


Рис. 2. Модель Солнца.

Графики изменения температуры и давления в зависимости от расстояния от центра Солнца приведены рис. 3.

Важная особенность расчета моделей Солнца является однородность, т.е. химический состав звезды предполагается постоянным во всем ее объеме. Известно, что возраст Солнца около 5 миллиардов лет. За такой огромный период времени произошло значительное умень-

шение содержания водорода в центральной части звезды. Следовательно, существует неопределенность в расчете модели Солнца, которая должна быть неоднородной.

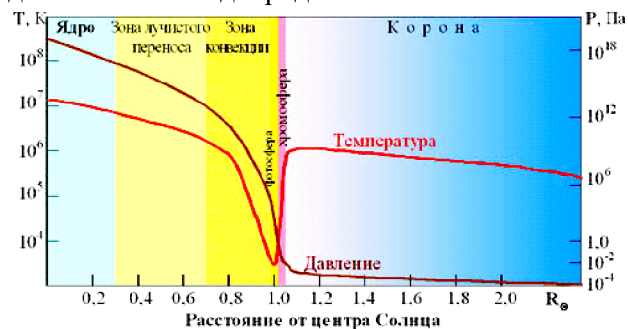


Рис. 3. Температура и давление в недрах и атмосфере Солнца

Центральная температура Солнца почти не зависит от конкретных особенностей различных моделей. Это означает, что основной термоядерной реакцией в недрах Солнца является протон-протонная реакция, хотя небольшой вклад дает также углеродно-азотный цикл. Так же как и у красных карликов, у модели Солнца на рис. 1 отсутствует конвективное ядро, однако размеры наружной конвективной зоны значительно меньше. Эта зона содержит всего около 2% массы Солнца. Центральная плотность Солнца довольно велика, она почти в 100 раз превосходит среднюю плотность. Такая большая концентрация массы к центру объясняется частичным выгоранием водорода в центральных областях Солнца.

Учитывая изложенное выше, а также, опираясь на опыт анализа аварийных ситуаций, приводящих к кризису теплообмена на ядерных реакторах с большим сроком эксплуатации [3], предлагается модель Солнца и звезд подобного типа, которая базируется на гипотезе о волновой природе регулирования энерго- и тепловыделения в их недрах.

Волновая модель тепловыделения Солнца и звезд как естественных термоядерных реакторов

Опираясь на результаты анализа аварийных ситуаций, приводящих к кризису теплообмена на ядерных реакторах с большим сроком эксплуатации, предлагается модель Солнца и звезд, которая базируется на гипотезе о волновой природе регулирования энерго- и тепловыделения в их недрах.

Одним из подходов к управлению как ядерными, так и естественными термоядерными реакторами является использование кривизны про-

странства. При воздействии на подкритический ядерный реактор, содержащий продукты воспроизводства, высокочастотным электромагнитным излучением происходит мгновенный рост реактивности. В определенных условиях вокруг ядерного реактора, находящегося в состоянии близком к мгновенной критичности, искривляется пространство. Пространственно-временной механизм позволяет перевести такой реактор в подкритическое состояние и удерживать его в нем [7]. При этом формируется пространственно-временной монополю. С течением времени монополю распадается, оставляя ядерный реактор в подкритическом состоянии.

Вопросы, связанные с созданием и функционированием пространственно-временных монополей ядерного реактора и естественных реакторов рассмотрены в работах [4-6]. Пространственно-временной монополю – это устойчивое макроскопическое образование, объединяющее различной кривизны с различным течением времени пространства, обусловленные электромагнитными и гравитационными эффектами. Такое образование имеет возможность квантового изменения границ и кривизны пространств за счет вызванного внешними факторами кантования энергии ядра монополя [4].

Наиболее близкой к идеям предлагаемой волновой модели Солнца и пространственно-временного механизма управления его целостностью является гипотеза, высказанная Фаулером для решения проблемы нейтринного излучения Солнца [1,2]. Он предположил, что несколько миллионов лет назад во внутренних слоях Солнца произошло сравнительно быстрое, как бы скачкообразное перемешивание вещества. Сейчас Солнце находится в необычном, переходном состоянии. Через несколько миллионов лет физические условия в недрах Солнца вернутся к первоначальному состоянию. Поток нейтрино от Солнца определяется мгновенным состоянием солнечных недр. Возможна ситуация, когда температура в центре Солнца падает, сразу же резко уменьшается поток нейтрино, в то время как светимость Солнца останется неизменной. Развитие гипотезы Фаулера содержится в работах Эзера, Камерона, Сакураи. Неоднородность недр Солнца и возможность их периодического перемешивания выдвигаются причиной изменения нейтринного излучения во времени.

Как известно суть термоядерных реакций, происходящих в недрах Солнца, сводится к тому, что четыре протона объединяются в одну альфа-частицу [1]. При этом испускаются два

нейтрино. При каждом таком «объединении» выделяется около 25 МэВ энергии, которая в конечном результате выделяется в межзвездное пространство, обеспечивая светимость Солнца (L_c). В соответствии с теоретическими расчетами полное количество нейтрино, образующихся в недрах Солнца, $N = 2L_c/25 \text{ МэВ} = 10^{39} \text{ с}^{-1}$, а поток их на Земле $N/4\pi r^2 = 10^{11} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Это огромная величина, однако, на практике она в три раза меньше.

В соответствии с существующими гипотезами значительное расхождение между ожидаемым результатом и данными наблюдений потока солнечных нейтрино в настоящее время определяется фазой расширения солнечного ядра.

Не подвергая сомнению общую идею периодичности изменения нейтринного потока, необходимо отметить следующее. Размах колебаний энергии не может быть настолько значительным, т.е. в три раза превышать экспериментальную величину даже при условии, что она минимальна.

В настоящее время уже обнаружены гравитационные волны от взрыва звезд и других метagalктических тел. В связи с этим представляется закономерным создание новых звездных моделей, которые основываются на волновых процессах распределения энергии термоядерных реакций.

Предполагая мощное космическое воздействие на естественный термоядерный реактор – Солнце, которое привело к скачкообразному изменению его состояния, выдвигаются три гипотезы, положенные в основу волновой модели звезды.

Первая гипотеза. Сверхмассивное ядро звезды порождает гравитационные волны, которые осуществляют перенос энергии термоядерных реакций, протекающих в недрах звезды.

Вторая гипотеза. Гравитационные сжатие и расширение ядра звезды порождают колебания энергии, которые регулируют скорость протекания термоядерных реакций в недрах звезды.

Третья гипотеза. Большая часть энергии, переносимая гравитационной волной ядра, идет на создание пространственно-временного монополя, который определяет целостность звезды и ее системы.

Третья гипотеза объясняет несоответствие теоретической величины потока нейтринного излучения Солнца результатам экспериментов. Предполагается, что часть энергии нейтринного излучения расходуется на существование пространственно-временного монополя звезды.

Предлагаемая модель является имитационной. Моделирование процессов изменения рас-

пределения тепловыделения Солнца выполнено в программной среде MATLAB.

В основу данной модели положена волновая модель пространственного распределения при наличии деформации тепловыделения или энерговыделения ядерного реактора.

Для оперативной диагностики деформации полей энерго- и тепловыделения в активной зоне ядерного реактора анализируется соответственно размах значений энерговыделения в твэлах и размах температур теплоносителя на выходе в двух областях: 1) основной M1, находящейся в центре, с радиусом равным 1/3 радиуса активной зоны; 2) периферийной M2, расположенной за границами M1. Формулы определения данных коэффициентов следующие[3]

$$k_T = \frac{T_{\max}^{(M1)} - T_{\min}^{(M1)}}{T_{\max}^{(M2)} - T_{\min}^{(M2)}}, \quad (6)$$

$$k_N = \frac{N_{\max}^{(M1)} - N_{\min}^{(M1)}}{N_{\max}^{(M2)} - N_{\min}^{(M2)}}, \quad (7)$$

где k_T – коэффициента формы тепловыделения; k_N – коэффициент формы энерговыделения; $T_{\max}^{(M1)}$, $T_{\min}^{(M1)}$ – максимальная и минимальная температура теплоносителя на выходе для области M1; $T_{\max}^{(M2)}$, $T_{\min}^{(M2)}$ – максимальная и минимальная температура теплоносителя на выходе для области M2; $N_{\max}^{(M1)}$, $N_{\min}^{(M1)}$ – максимальное и минимальное энерговыделение твэла для области M1; $N_{\max}^{(M2)}$, $N_{\min}^{(M2)}$ – максимальное и минимальное энерговыделение твэла для области M2.

Волновая модель для ядерного реактора представляется суммой гармоник ($i=0, 1, 2, \dots$) и имеет вид

$$Z(x, y) = z_0(x, y) \pm \sum_{i=1}^l z_i(x, y),$$

$$z_i(x, y) = \sin(r_i(x, y)) / r_i(x, y), \quad i = \overline{0, l}, \quad (8)$$

$$r_0(x, y) = \frac{2}{3} \sqrt{\cos^2 x + \sin^2 y}, \quad (9)$$

$$r_j(x, y) = \beta_j \sqrt{x^2 + y^2} + (1 + k_0) \alpha_{j-1}, \quad j = \overline{1, l},$$

где Z – суммарная координата поверхности поля по высоте; x, y, z – координаты поверхности поля, создаваемого гармоникой; α – нуль функции Бесселя [7]; β – амплитуда гармоники функции Бесселя; k_0 – экспериментальный коэффициент деформации поля, рассчитанный на основе статистических данных по формуле (6,7).

Рассмотрим последовательность смены формы тепловыделения в радиальном направлении.

На рис. 4а представлено исходное логарифмическое распределение температуры Солнца, описанное как гармонический процесс следующим образом

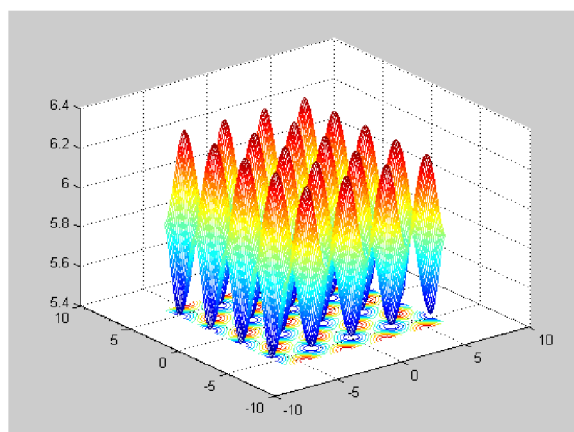
$$z_0(x, y) = 2\pi \sin(r_0(x, y)) / r_0(x, y),$$

где $r_0(x, y)$ определяется по формуле (9).

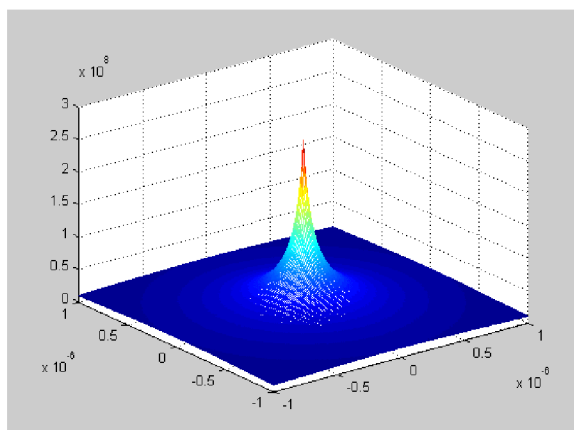
Результатом внешнего космического воздействия явился резкий всплеск температуры ядра Солнца, величина которого достигла порядка 100 млн. °K (рис. 4б). Это должно было бы привести к термоядерному взрыву, однако в силу некоторых причин сработал механизм искривления пространства [4]. Имитация последствий данного воздействия выполнена с использованием формул

$$z_1(x, y) = 2\pi \cos(r_1(x, y)) / r_1(x, y),$$

$$r_1(x, y) = 0.4\sqrt{x^2 + y^2} + 3\pi / 4 \cdot 10^{-8}.$$



а)



б)

Рис. 4. Результаты имитационного моделирования начального этапа энергоснабжения Солнца: а – исходное логарифмическое распределение температуры Солнца; б – распределение температуры в центре ядра звезды после мощного космического воздействия.

Подобное внешнее воздействие изменило скорость роста числа электронов в единице объема солнечной плазмы. Известна зависимость для ядерных реакторов скорости изменения плотности нейтронов от начальной плотности при постоянном уровне мощности и частоты. Аналогично для термоядерных реакторов скорость роста плотности электронов должна зависеть от начальной плотности и частоты ионизации плазмы. Влияние изменения частоты ионизации на состояние плазмы подобно влиянию изменения частоты реактивности на ядерный реактор.

Параллельно росту температуры центральной зоны ядра происходило его сжатие. Характер процесса деформации описывается зависимостями коэффициентов сдвига при сжатии K_C (кривая 1 на рис. 5) и расширении K_H (кривая 2 на рис. 5) формы распределения тепловыделения относительно центра от частоты ионизации плазмы. Существует линейная зависимость между амплитудой первой гармоники и этими коэффициентами. В точке Е при частоте $\omega_E = 1/3$ Гц (рис. 5а) температура центра ядра достигла критической величины, которая была достаточна для взрыва, но в результате наличия в пространстве некоего другого космического объекта, способного отражать солнечные гравитационные волны, произошло искривление пространства между этими двумя объектами, вызвавшее отток энергии взрыва на создание пространственно-временного монополя. Это привело к переходу ядра в состояние, соответствующее точке А (рис. 5а). Впоследствии процесс сжатия достиг на кривой 1 (рис. 5а) точки В. Возникли стоячие волны. Если бы перераспределения энергии в пространстве не было, то для Солнца началось бы расширение, описываемое кривой 3, представленной на рис. 5а пунктирной линией, т.е. произошло бы расширение, вызванное взрывом. Пространственно-временной монополю удерживает Солнце в состоянии, соответствующем точке В (рис. 5а). Это состояние характеризуется периодичностью смены процесса расширения и сжатия ядра и, следовательно, колебания всего тепловыделения звезды.

С течением времени произойдет распад монополя, и состояние Солнца будет описывать переходом по кривой 2 в точку С (рис. 5а). Чтобы Солнце не остыло и продолжало существовать необходимо очередное мощное космическое воздействие. В этом случае цикл искривления пространства-времени повторится вновь. Таким образом, Солнце является импульсным термоядерным реактором.

Цикл работы этого естественного реактора представлен на рис. 5б. Точке В на рис. 3б соответствует значение $3\pi/4$, а точке С – $7\pi/4$. Длительности процессов сжатия (кривая 1 на рис. 5б) и расширения (кривая 2 на рис. 5б) совпадают и равны π , а весь период преобразования энергии и пространства составляет 2π .

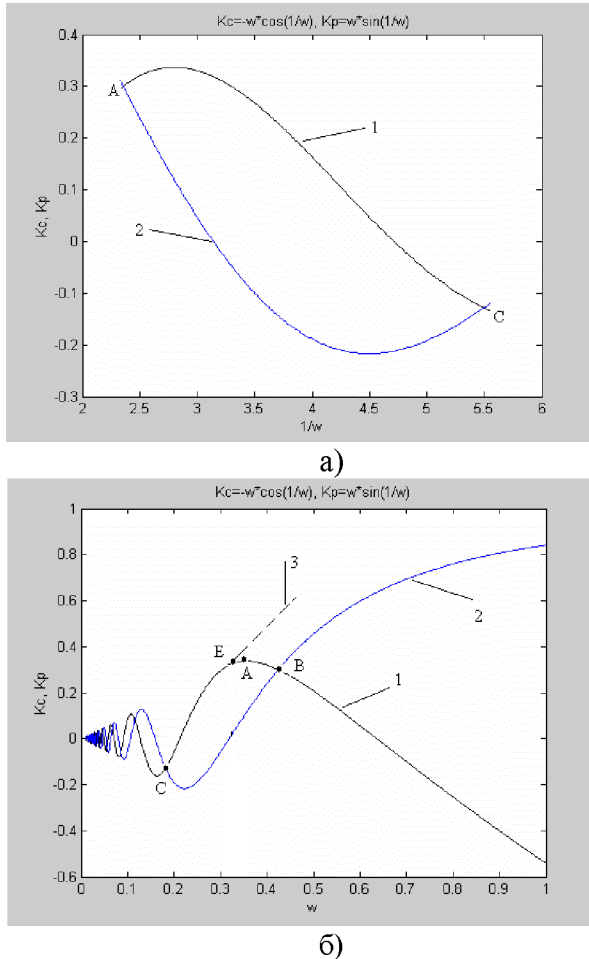


Рис. 5. Влияние на амплитуду первой гармоники частоты ионизации плазмы (Гц): а – графики зависимости коэффициентов сдвига от частоты; б – цикл изменения коэффициентов сдвига: 1 – расчет при сжатии ядра звезды; 2 – расчет при расширении ядра звезды; 3 – кривая взрыва.

Распределение солнечной температуры, данное в логарифмическом масштабе ($\lg T$), по радиусу R (в масштабе $4\pi R$) для состояния, соответствующего точке Е на кривой 1 (рис. 5а), приведено на рис. 6а. При моделировании использовались следующие соотношения

$$Z = 2\pi(z_0 - z_1),$$

$$z_1(x, y) = \cos(r_1(x, y)) / r_1(x, y),$$

$$r_1(x, y) = 0.4\sqrt{x^2 + y^2} + 1/w_E,$$

где $z_0(x, y)$ определяется по формулам (8, 9); w_E – частота первой гармоники в точке Е (рис. 5а).

Для точки В на кривой 1 (рис. 5б) распределение логарифма температуры на расстоянии два радиуса от центра (в масштабе $4\pi R$) для расширения ядра представлено на рис. 6б. Моделирование выполнено в соответствии со следующими соотношениями

$$Z = 2\pi \frac{w_E}{w_A} (z_0 - z_1), \quad (10)$$

$$z_1(x, y) = \sin(r_1(x, y)) / r_1(x, y), \quad (11)$$

$$r_1(x, y) = 0.4\sqrt{x^2 + y^2} + 1/w_B, \quad (12)$$

где $z_0(x, y)$ определяется по формулам (8, 9); w_A и w_B – частота первой гармоники в точках А и В соответственно (рис. 5а).

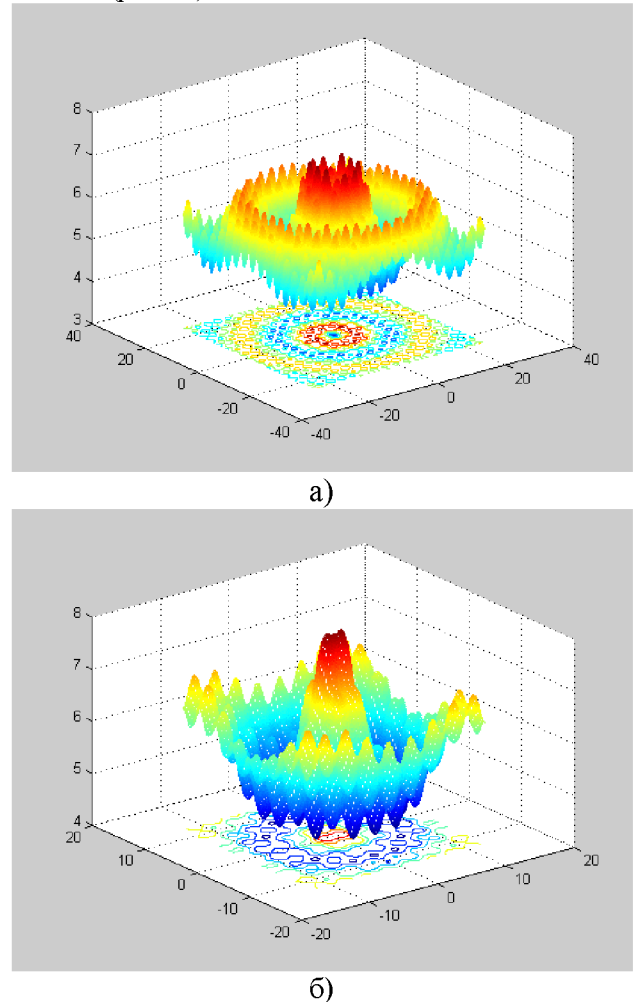


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования распределение температуры Солнца в логарифмическом масштабе: а – на расстоянии двух радиусов от центра для состояния в точке Е на кривой 1 на рис. 5а; б – на расстоянии одного радиуса от центра для состояния в точке В на кривой 1 на рис. 5а при расширении ядра (масштаб $4\pi R$).

Исходя из соотношений имитационной модели (10-12), коэффициенты K_C и K_H определяются значением первой гармоники в нулевой точке соответствующего процесса изменения тепловыделения без масштабного множителя равного 2π (w_E/w_A).

Делается предположение, что для ядра Солнца (возможно, любой звезды данного типа) характерны значительные колебания тепловыделения. В центре ядра (рис. 7) температура сопоставима с температурой на поверхности звезды, т.е. на расстоянии солнечного радиуса. Такое различие позволяет реализовать сжатие и растяжение ядра (в модели по оси X), стабилизирующие скорость протекания ядерных реакций. По оси Z колебания медленные.

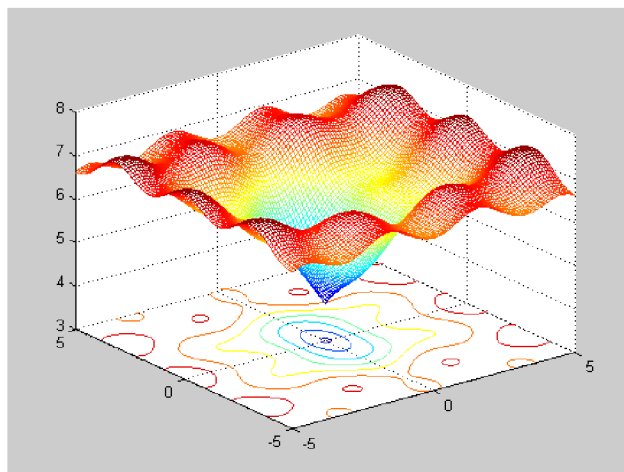


Рис. 7. Распределение температуры в центре ядра Солнца, рассчитанное в логарифмическом масштабе.

В настоящее время звезда находится в равновесном состоянии. Полученное распределение тепловыделения (рис. 6а) с учетом состава вещества соответствует графикам изменения температуры на рис. 3.

Ниже приведен фрагмент программной модели, реализующей имитацию распределения температуры в логарифмическом масштабе при наличии гравитационной волны, порождаемой ядром звезды (рис. 8).

```
figure(1),
k=6;
k1=4;
n=k1*pi;
[X,Y]=meshgrid(-n:0.1:n);
R0=0.66*sqrt(cos(X).^2+sin(Y).^2);
Z0=sin(R0)/R0;
R1=0.4*sqrt(X.^2+Y.^2)+2.38;
```

```
Z1=sin(R1)/R1;
Z=k*(Z0-Z1);
meshc(X,Y,Z);
```

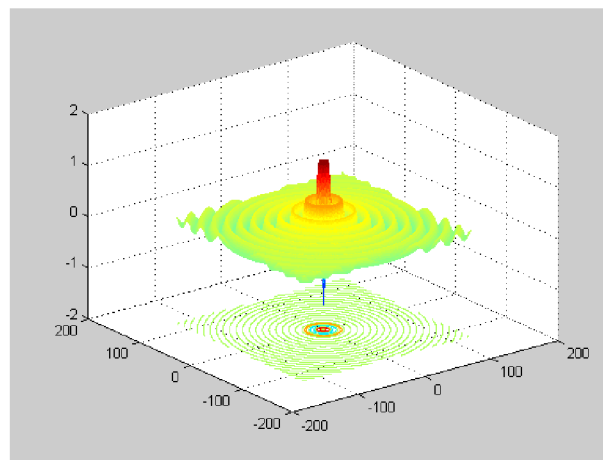


Рис. 8. Графическое представление распределения температуры (логарифмический масштаб) гравитационной волны, порождаемой ядром звезды с коэффициентом масштаба в радиальном направлении $k=6$.

Представляется, что основным достоинством предложенной модели является не ее простота и наглядность, а определение перспектив использования волнового подхода при реализации управления термоядерными реакторами в земных условиях.

Масштаб в модели задается реальными величинами параметров звезды. Предполагается в дальнейшем выполнить более детальное исследование данного вопроса.

Заключение

Предложена принципиально новая звездная модель, основанная на волновых процессах распределения энергии термоядерных реакций в недрах звезды. Выдвинуты три гипотезы, утверждающие следующее: 1) перенос энергии термоядерных реакций осуществляется гравитационными волнами; 2) регулирование скорости протекания термоядерных реакций происходит за счет гравитационных сжатия и расширения ядра звезды; 3) часть энергии, переносимой гравитационной волной, идет на создание пространственно-временного монополя, определяющего целостность звезды. Предложено решение проблемы солнечных нейтрино. Предполагается, что часть энергии нейтринного излучения расходуется на существование пространственно-временного монополя звезды.

Разработана простая и наглядная волновая модель распределения тепловыделения звезд, аналогичных Солнцу. Проведено имитационное моделирование процесса распределения тепловыделения в радиальном направлении от центра звезды.

Результаты исследования определяют новые возможности для изучения динамики звезд и открывают новые перспективы реализации управления термоядерными реакторами в земных условиях.

Список литературы

1. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – М.: Наука, 1984. – 384с.
2. Вебер Дж. Общая теория относительности и гравитационные волны – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1962. – 272с.
3. Качур С.А. Статистический метод диагностики пространственного распределения энергии в активной зоне ядерного реактора / С.А. Качур, Е.М. Кошевская // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.1. – №2. – С. 15-20.
4. Качур С.А. Управление ядерными реакторами на основе кривизны пространства./ С.А. Качур. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2016. – 220с.
5. Качур С.А. Модуляция сингулярности ядерного реактора вблизи мгновенной критичности. / С.А. Качур // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2015. – Т.1. – №1. – С. 18-26.
6. Качур С.А. Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей/ С.А. Качур // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №1. – С. 12-19.
7. Качур С.А. Исследование управляемости ядерного реактора на основе анализа функции Бесселя/ С.А. Качур // Сб.науч.тр.СНУЯЭтаП – Вып.2(46). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – С.36-45.
4. Kachur S.A. *Upravlenie yadernymi reaktorami na osnove krivizny prostranstva* [Control by nuclear reactors on the basis of space curvature]. Sevastopol: «RIBEST». 2016, 220p.
5. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2015, Vol. 1, No 1, pp. 18-26.
6. 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.
7. 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.

References

1. Shklovskij I.S. *Zvyozdy: ih rozhdenie, zhizn' i smert'* [Stars: their birth, life and death]. Moscow, Nauka. 1984, 384p.
2. Weber J. *Obschaya teoriya otnositel'nosti i gravitacionnye volny* [General relativity and gravitational waves]. Moscow, Iz-vo inostr. lit-ry. 1962, 272 p.
3. Kachur S.A., Koshevskya E.M. Diagnostics statistical method of energy spatial distribution in active zone of nuclear reactor. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 1, No 2, pp. 15-20.

УДК 621.039.56

Физическое моделирование тепловыделения в обмотках статора турбогенератора на основе акустического метода

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

Статья поступила 28.09.2016 г.; после доработки 30.09.2016 г.

Аннотация

Предложена физическая модель процесса теплообмена турбогенератора, дающая возможность проводить физическое моделирование аварийных ситуаций, приводящих к разрушению обмоток статора. Разработана методика создания экспериментального макета турбогенератора и программно-аппаратного комплекса, основанного на акустических методах диагностики неисправности.

Ключевые слова: турбогенератор, статор, акустический анализ, физическое моделирование, тепловыделение.

Physical Modeling of Heat Rate in the Turbogenerator Stator Winding on the Basis of Acoustic Method

S.A. Kachur, N.V. Shakhova, S.V. Petrov, K.P. Anikevich, A.A. Chuklin
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 28.09.2016 y.; received in final form 30.09.2016 y.

The physical model of process of heat exchange of turbogenerator is offered, enabling to conduct the physical design of emergency situations resulting in destruction of stator winding. The method of creation of experimental model of turbogenerator is developed and hardware-software complex based on the acoustic methods of disrepair diagnostic.

Keywords: turbogenerator, stator, acoustic analysis, physical modelling, heat rate.

Введение

Одним из главных факторов, обеспечивающих бесперебойное функционирование ядерных энергетических установок (ЯЭУ), является высокая надежность работы оборудования, в том числе турбогенераторов. Изменение технического состояния объектов в процессе эксплуатации обусловлено воздействием различных эксплуатационных факторов, которые в свою очередь обуславливают протекание физико-химических процессов в элементах конструкции ЯЭУ и ее функциональных системах [1].

Анализ повреждений статора турбогенератора позволяет сделать следующее заключение:

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

В качестве метода идентификации состояния турбогенератора предлагается использова-

ние метода акустического анализа наиболее «горячих» точек (МАО НГТ) турбогенератора [3].

Предварительно, до проведения эксперимента на реальном оборудовании, необходимо провести физическое моделирование аварийных процессов в обмотках статора турбогенератора при помощи более простых и наглядных явлений. Как известно, физическое моделирование осуществляется путем воспроизведения исследуемого процесса на модели, имеющей в общем случае отличную от оригинала природу, но одинаковое математическое описание процесса функционирования. При этом физические процессы, протекающие в модели и оригинале, являются подобными [6].

Для моделирования и анализа нарушений теплообмена в обмотках статора турбогенератора предлагается разработать экспериментальный макет на базе лабораторного стенда «Электроника» [5].

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – идентификация состояния статора турбогенератора при нарушении процессов теплообмена на основе физического моделирования.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) разработать физической модели макета, имитирующего процесс теплообмена и позволяющего детектировать тепловые шумы турбогенератора; 2) разработка методики использования программно-аппаратного комплекса для измерения параметров физического макета турбогенератора.

Физическая модель макета для имитации процесса теплообмена и детектирования тепловых шумов турбогенератора

Для физической имитации изменения теплообмена турбогенератора предлагается использовать силовые трансформаторы маломощных выпрямителей. Силовые трансформаторы маломощных выпрямителей, используемых для питания электронной аппаратуры, представляют собой электромагнитные устройства, состоящие из ферромагнитного сердечника (магнитопровода) и обмоток [6].

В качестве трансформаторов, имитирующих тепловые флуктуации шумов, будут применяться двухобмоточные трансформаторы, а для имитации шума основного диапазона частот при номинальных условиях работы турбогенератора –

трехобмоточный трансформатор. В совокупности все трансформаторы имитируют шум турбогенератора при изменении температурного режима.

Основной трехобмоточный трансформатор Tr_0 при проведении эксперимента работает на максимальной мощности и создает наибольший шум. Шумы вспомогательных двухобмоточных трансформаторов Tr_k ($k=1, \dots, m$) варьируются посредством токов нагрузки во вторичных обмотках, изменяемых потенциометрами R_k . Схема включения вспомогательного трансформатора приведена на рис. 1.

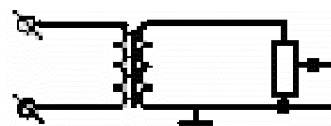


Рис. 1. Схема включения вспомогательного трансформатора

Покажем, что увеличение тока в обмотке трансформатора приводит к изменению температуры обмотки и, следовательно, к появлению дополнительных шумов. Для этого воспользуемся формулами расчета маломощных силовых трансформаторов [6].

Температура перегрева обмоток относительно окружающей среды определяется по формуле

$$\Delta T = \frac{P_{CT} + P_{MO}}{\alpha_T (Q_K + Q_C)}, \quad (1)$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи трансформатора (обычно принимают $\alpha_T = (11 \dots 13) \text{ Вт/м}^2 \cdot ^\circ\text{C}$); Q_K – поверхность охлаждения обмотки, м^2 ; Q_C – поверхность охлаждения магнитопровода, м^2 ; P_{CT} – потери в стали, Вт; P_{MO} – суммарные потери в меди всех обмоток, Вт.

Потери в стали находятся следующим образом

$$P_{CT} = \sigma G_{CT}, \quad (2)$$

где σ – удельные потери (Вт/кг), которые зависят от марки стали, толщины пластины или ленты, магнитной индукции и частоты сети; G_{CT} – масса стали магнитопровода, кг (определяется из таблиц для заданного типа магнитопровода).

Суммарные потери в меди всех обмоток

$$P_{MO} = \sum_{i=1}^n P_{Mi}, \quad (3)$$

$$P_{Mi} = 2,7 j_i^2 G_{Mi}, \quad (4)$$

где i – номер обмотки трансформатора; P_{Mi} – потери в меди i -й обмотке, Вт; j_i – плотность тока в i -й обмотке, А/мм^2 ; G_{Mi} – масса i -й обмотки, кг.

Действительная плотность тока в обмотках составляет

$$j_i = I_i / q_i, \quad (5)$$

$$I_i = S_i / U_i, \quad (6)$$

где q_i – поперечные сечения проводов i -й обмотки, мм²; I_i – ток i -й обмотки трансформатора, А; S_i – мощность i -й обмотки, В·А; U_i – напряжение обмотки, В.

Исходя из (1-6), изменение температуры обмоток k -о трансформатора является функцией тока в его обмотках

$$\Delta T^{(k)} = f_1(I^{(k)})$$

и, следовательно, амплитуда шума $S_A^{(l)}$ ($l=1, \dots, r$), измеряемая l -м датчиком, зависит от токов в обмотках дополнительных трансформаторов

$$S_A^{(l)} = f(I^{(1)}, \dots, I^{(m)}).$$

Макет турбогенератора представляет собой цинковый цилиндр, в центре которого помещен основной трансформатор. На внутренней стороне цилиндра закреплены дополнительные трансформаторы, первичная обмотка которых подключена к сети напряжением 220В и частотой 50 Гц, а вторичная – к потенциометру. Акустические датчики установлены на внешней стороне цилиндра. Выходы всех трансформаторов и датчиков подключены к каналам АЦП. Количество датчиков и трансформаторов определяется числом каналов АЦП.

Исходя из того, что АЦП принятого в качестве основы стенда «Электроника» имеет 21 канал, макет включает следующее количество элементов: основной трансформатор – 1шт., вспомогательные трансформаторы – 8шт., акустические датчики – 12шт. Развертка цилиндра с расположением элементов макета представлена на рис. 2.

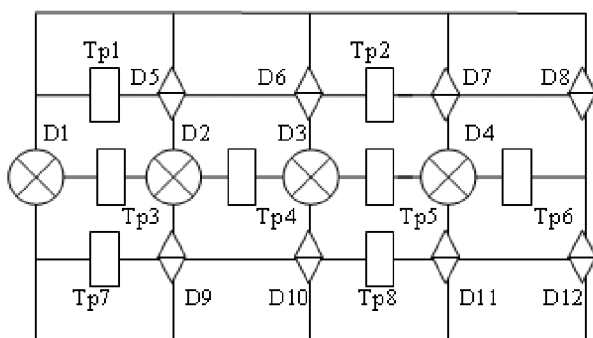


Рис. 2. Схема расположения элементов макета: □ – вспомогательные трансформаторы, ⊗ – основные акустические датчики, ◇ – вспомогательные акустические датчики.

В соответствии с МАА НГТ различают основные и вспомогательные акустические датчики. Информация вспомогательных датчиков используют для повышения точности определения наиболее «горячих» точек. В связи с этим предлагается использовать четыре основных датчика и 8 вспомогательных датчиков.

Методика использования программно-аппаратного комплекса для проведения физического моделирования

Структурная схема разрабатываемого программно-аппаратного комплекса включает три последовательно соединенных основных блока: макет турбогенератора, цифровой осциллограф, персональный компьютер.

Цифровой осциллограф и персональный компьютер входят в состав стенда «Электроника». Структура этого стенда представлена на рис. 3 [5].

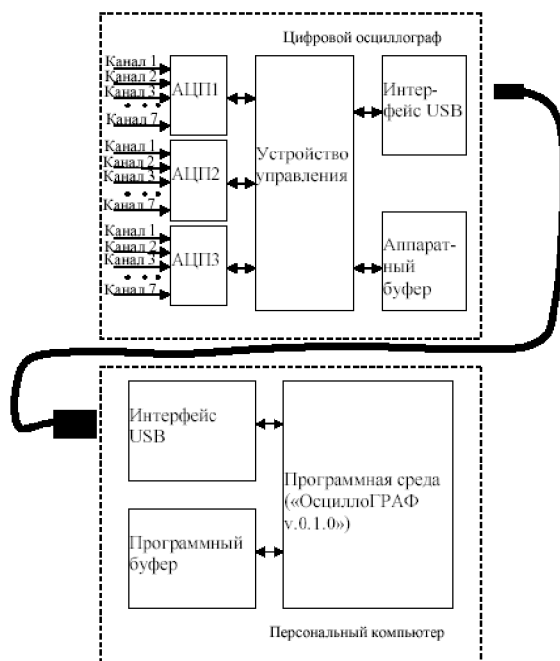


Рис. 3. Структура программно-аппаратного комплекса стенда «Электроника»

«ОсциллоГРАФ v.0.1.0» – программа-визуализатор для цифровых осциллографов 3ADC-7-1000-USB и 1ADC-7-1000-USB-A. Программа выполняет функции настройки и калибровки АЦП и отдельно каждого канала АЦП, визуализацию оцифрованных сигналов в виде графиков и рассчитанных характеристик.

Программно-аппаратный комплекс работает следующим образом.

Программа «ОсциллоГРАФ v.0.1.0» загружает в цифровой осциллограф данные о используемых АЦП и каналах и запускает работу осциллографа. Управляющее устройство соответственно конфигурирует каждый АЦП. Оцифрованные сигналы с используемых каналов передаются в устройство управления. Устройство управления размещает эти данные во внутреннем циклическом буфере цифрового осциллографа. По запросам с персонального компьютера эти данные извлекаются из аппаратного буфера и передаются по интерфейсу USB.

Калибровочные данные по каждому каналу АЦП хранятся непосредственно во внутренней памяти цифрового осциллографа. Перед запуском осциллографа и при загрузке программы, эти данные считываются в персональный компьютер.

Возможна ситуация, когда темп заполнения аппаратного буфера данными выше, чем темп отправки их в персональный компьютер. В этом случае работа осциллографа приостанавливается.

Полученные данные программа «ОсциллоГРАФ v.0.1.0» помещает в программный циклический буфер, размер которого может устанавливаться пользователем. Данные накапливаются постоянно, независимо от скорости отображения их на экране. Программа всегда отображает последние принятые данные.

Данные для электронного осциллографа поступают с выходов макета турбогенератора. Результаты функционирования разработанного макета представляются в виде осциллограмм (рис. 4).

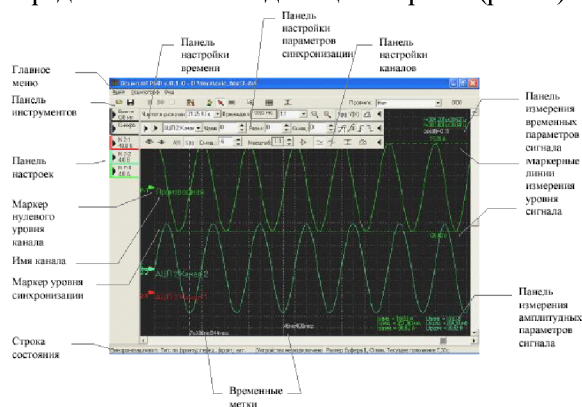


Рис. 4. Вид осциллограмм сигналов с выхода макета турбогенератора

Программная система анализа результатов физического моделирования представляет собой реализацию в среде MATLAB метода акустического анализа наиболее «горячих» точек, исходной информацией для которого являются данные

программного циклического буфера программно-аппаратного комплекса стенда «Электроника».

В качестве вероятностной модели повреждений статора рассматривается множество засоренных частей выборок амплитуд флуктуационных сигналов, измеряемых расположенными на поверхности макета турбогенератора детекторами шума.

В методе акустического анализа наиболее «горячих» точек на первом этапе измерений используется n основных детекторов шума d_i ($i = \overline{1, n}$), схема расположения которых на поверхности турбогенератора образует координатную сетку. На втором этапе производится уточнение координат НГТ, т.е. по результатам измерений первого этапа для каждого детектора d_x , находящегося в НГТ, рассматриваются вспомогательные детекторы d_{xi} ($i = \overline{1, 8}$), расположенные по схеме деления отрезков основной координатной сетки пополам. Подробное описание этого метода дано в [3].

Результатом анализа показаний детекторов является дерево решений. Листьям дерева решений соответствуют координаты НГТ на поверхности турбогенератора. При прохождении дерева решений от корня к листьям сопоставляется уровню дерева цветовой аналог от белого до красного по степени возрастания опасности аварийной ситуации. Количество уровней дерева решения отражает степень риска, увеличивающуюся с номером уровня. Четвертый уровень отражает плавление обмотки турбогенератора, поскольку отклонения амплитуды S_A от ее среднего значения по турбогенератору превышает $3\sigma_A$ с учетом преобразований по дереву решений, это означает, что процесс не управляем.

Выходная информация программной системы отражается в виде картограммы поверхности турбогенератора, в которой цветовая гамма областей наносится в соответствии с вектором UX координат наиболее «горячих» точек распределения тепловых шумов.

Соответствие распределения шумов, полученное с помощью МАА НГТ, эмпирическим зависимостям показаний акустических датчиков от токов обмоток определяет достоверность использованного акустического метода.

Заключение

Предложена физическая модель процесса теплообмена турбогенератора, дающая возможность осуществлять физическое моделирование

аварийных ситуаций, приводящих к разрушению обмоток статора. Модель позволяет провести исследование процессов, непосредственный анализ которых затруднен или невозможен, определить влияние различных параметров на протекание процесса теплообмена, иллюстрировать сложное явление и объяснить его при помощи более простых и наглядных явлений.

Разработана методика создания экспериментального макета турбогенератора, который может быть применен для тестирования метода акустического анализа наиболее горячих точек обмоток статора турбогенератора.

В перспективе программно-аппаратный комплекс для измерения параметров физического макета турбогенератора может быть использован в качестве тренажера для обучения персонала АЭС.

Список литературы

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций/ В.А. Острейковский – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
2. Алексеев Б.А. Определение состояния (диагностика) крупных турбогенераторов/ Б.А. Алексеев – М.: Из-во НЦ ЭМАС, 2001. – 152с.
3. Качур С.А. Метод акустического анализа поврежденных обмоток статора турбогенератора/ С.А. Качур, Н.В.Шахова // Сб. науч. тр. СТУЯЭиП – Вып.1(37). – Севастополь: СТУЯЭиП, 2011. – С. 21-25.
4. Клир Дж. Системология. Автоматизация решения системных задач – М.: Радио и связь, 1990 – 538с.
5. Качур С.А. Практикум по электронике./ С.А. Качур, С.В. Петров, В.Б. Гончаренко – Севастополь: СТУЯЭиП, 2012. – 124с.
6. Гершунский В.С. Справочник по расчету электронных схем/ В.С. Гершунский – Киев: Высшая школа, 1983. – 240с.

References

1. Ostrejkovskij V.A. *Ekspluatatsiya atomnyh stancij* [Exploitation of the atomic stations]. Moscow, Energoizdat, 1999, 928 p.
2. Alekseev B.A. *Opredelenie sostoyaniya (diagnostika) krupnyh turbogeneratorov* [Determination of the state (diagnostics) of large turbogenerators]. Moscow, Iz-vo NC EMAS, 2001, 152 p.
3. Kachur S.A., Shahova N.V. *Method of acoustic analysis of damages of winding of turbogenerator stator. Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sevastopol, SNUYaE i P, 2011, No. 1(37), pp. 21-25.
4. Klir Dzh. *Sistemologiya. Avtomatizatsiya resheniya sistemnyh zadach* [Systemslogic. Automation of decision of system tasks]. Moscow, Radio i svyaz', 1999, 538 p.
5. Kachur S.A., Petrov S.V., Goncharenko V.B. *Praktikum po elektronike* [Practical work on electronics]. Sevastopol, SNUYaE i P, 2012, 124p.

6. Gershunkij V.S. *Spravochnik po rascgnyotu elektronnyh shem* [Reference book upon settlement of electronic charts]. Kiev, Vysshya shkola, 1983, 240p.

УДК 621.039.514

Оценка отравления ВВЭР-1000 ксеноном по данным теоретических расчетов

Г.Я.Мерзликин¹, В.В.Шаповаленко²^{1,2} ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г.Севастополь, 299053, Россия, ¹merzlikinG@mail.ru ²shapovalenkovita@rambler.ru

Статья поступила 01.09.2016 г. ; после доработки 05.09.2016 г.

Аннотация

Сопоставление величин стационарных и нестационарных отравлений ксеноном-135, полученных в результате аналитических расчетов, с опытными данными эксплуатации на АЭС с серийными реакторами ВВЭР-1000.

Ключевые слова: стационарные процессы отравления ксеноном, нестационарные процессы отравления ксеноном, ксенон-135, дифференциальные уравнения, мощность реактора.

Assessment toxicity to the VVER-1000 xenon according to the theoretical calculations

G.Ya.Merzlikin¹, V.V.Shapovalenko²^{1,2} Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ¹merzlikinG@mail.ru ²shapovalenkovita@rambler.ru

Received 01.09.2016 y. ; received in final form 05.09.2016 y.

Abstract

A comparison of the values of stationary and unstationary poisoning with xenon-135, obtained in the result of analytical calculations with the experimental data of operating NPP with the serial VVER-1000 reactors.

Keywords: stationary processes of poisoning by xenon, unstationary processes of poisoning by xenon, xenon-135, the differential equation, the reactor power.

Введение

Отравлением реактора принято называть процесс накопления в его твэлах короткоживущих поглощающих нейтроны продуктов деления, приводящий к потерям реактивности реактора. Главным среди этих продуктов является ксенон-135, и то, что приписывается воздействию на реактор одного ксенона-135, есть результат более сложного суммарного воздействия на реактивность реактора вследствие накопления в твэлах реактора множества разных короткоживущих поглотителей. Но, вместе с тем, моноксеноновая модель отравления реактора с приписываемыми ему нейтронно-физическими свойствами

[1] ($\sigma_a = 2.72 \cdot 10^6$ барн, $T_{1/2} = 9.2$ часа) дает достаточно точную картину того, что можно наблюдать и измерять на действующих реакторах.

Постановка цели и задачи

Задачами работы является получение системы дифференциальных уравнений с мощностью ядерного реактора в качестве главного параметра, решение этих уравнений и сравнение данных теоретического расчета отравлений ВВЭР-1000 ксеноном-135 с данными технической документации серийного ВВЭР-1000 с целью проверки возможности

их использования при эксплуатации реактора на АЭС.

Дифференциальные уравнения отравления реактора ксеноном [2]

$$\begin{cases} \frac{dN_{Xe}}{dt} = \gamma_{Xe} \sigma_f^5 N_5(t) \Phi(t) + \\ + \lambda_J N_J(t) - \sigma_a^{Xe} N_{Xe}(t) \Phi(t) - \\ - \lambda_{Xe} N_{Xe}(t). \\ \frac{dN_J}{dt} = \gamma_J \sigma_f^5 N_5(t) \Phi(t) - \lambda_J N_J(t). \end{cases} \quad (1)$$

где; $\gamma_{Xe} \sigma_f^5 N_5(t) \Phi(t)$ - темп генерации ^{135}Xe как непосредственного осколка деления;

$+ \lambda_J N_J(t)$ - темп генерации ^{135}Xe как продукта β -распада ^{135}J ;

$- \sigma_a^{Xe} N_{Xe}(t) \Phi(t)$ - темп убыли ^{135}Xe в результате его выгорания (поглощения нейтронов);

$- \lambda_{Xe} N_{Xe}(t)$ - темп убыли ^{135}Xe вследствие его β -распада;

$\gamma_J \sigma_f^5 N_5(t) \Phi(t)$ - темп генерации ^{135}J как осколка деления;

$- \lambda_J N_J(t)$ - темп β -распада ^{135}J .

Неудобство этих уравнений в том, что в них входит величина Φ , которая в процессе работы реактора фактически не контролируется. В то же время главная контролируемая оператором величина – мощность реактора – фигурирует в них в скрытом виде - средней величины плотности потока нейтронов в твэлах (Φ), которая измеряется местами и косвенно с помощью датчиков СВРК. Мощность реактора и темп делений связаны соотношением:

$$N_p = \Delta E \sigma_f^5 N_5(z) \Phi(z) V_{\text{тк}}. \quad (2)$$

где:

- ΔE - средняя энергия, получаемая в одном акте деления ядра ^{235}U ($\Delta E \approx 3.2 \cdot 10^{-11}$ Дж/дел);

- σ_f^5 - эффективное микросечение деления ^{235}U , см²;

- $N_5(z)$ - средняя по объему топлива ($V_{\text{тк}}$) активной зоны концентрация ядер ^{235}U в рассматриваемый момент кампании, определяемый величиной степени выгорания $^{235}\text{U}(z)$.

Условие постоянства любого уровня мощности реактора в любой момент кампании:

$$N_5(z) \cdot \Phi(z) = \text{idem} = N_5^0 \cdot \Phi_0 \quad (3)$$

Следовательно, для обеспечения постоянства любого уровня мощности надо увеличивать в процессе кампании величину средней плотности потока тепловых нейтронов по закону:

$$\Phi(z) = \frac{N_5^0 \cdot \Phi_0}{N_5(z)}, \quad (4)$$

а так как концентрация основного топлива (^{235}U) в процессе его выгорания уменьшается по линейному закону $N_5(z) = N_5^0 \cdot (1 - z)$, то

$$\Phi(z) = \frac{\Phi_0}{1 - z}. \quad (5)$$

Деление обеих частей равенства (3) на величину объема топливной композиции в твэлах даёт величину среднего в объеме топлива твэлов удельного энерговыделения (q):

$$q = \frac{N_p}{V_{\text{тк}}} = C \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5^0 \cdot \Phi_0 \quad (6)$$

Эта средняя величина во всех отношениях удобнее и понятнее, чем набор из трех средних величин ($\sigma_f^5, N_5^0, \Phi_0$).

Из (6) следует, что величина произведения трех сомножителей

$$\sigma_f^5 \cdot N_5^0 \cdot \Phi_0 = \frac{q}{C} \quad (7)$$

Для того, чтобы выразить величину $\Phi(z)$ через q , числитель и знаменатель правой части выражения (5) умножаются на $\sigma_f^5 \cdot N_5^0$:

$$\Phi(z) = \frac{\sigma_f^5 N_5^0 \Phi_0}{\sigma_f^5 N_5^0 (1 - z)} = \frac{q}{C \sigma_f^5 N_5^0 (1 - z)}. \quad (8)$$

Подстановка (7) и (8) в систему исходных уравнений (1) даёт [4]:

$$\begin{cases} \frac{dN_{Xe}}{dt} = \gamma_{Xe} \cdot \frac{q}{C} + \lambda_J \cdot N_J(t) - \\ - \left(\lambda_{Xe} + \frac{\sigma_a^{Xe} \cdot q}{C \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5^0 \cdot (1 - z)} \right) \cdot N_{Xe}(t). \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{dN_J}{dt} = \gamma_J \frac{q}{C} - \lambda_J N_J(t). \quad (10)$$

Такова система дифференциальных уравнений отравления реактора ксеноном, выраженная через неизменную на любом уровне мощности в процессе кампании величину среднего удельного тепловыделения в топливе ТВЭЛов реактора. В теории отравления реакторов величину коэффициента перед $N_{Xe}(t)$ в (9) называют *эффективной постоянной распада ксенона* при заданном уровне мощности (при котором средняя энергонапряженность топлива в его ТВЭлах равна q).

$$\lambda_{Xe}^*(q) = \lambda_{Xe} + \left(\frac{\sigma_a^{Xe}}{C \cdot \sigma_f^5 \cdot N_s^0 \cdot (1-z)} \right) \cdot q =$$

$$= \lambda_{Xe} \left[1 + \frac{\sigma_a^{Xe}}{C \cdot \lambda_{Xe} \cdot \sigma_f^5 \cdot N_s^0 \cdot (1-z)} \cdot q \right]. \quad (11)$$

Эта величина показывает, во сколько раз темп убыли ксенона от распада и выгорания больше темпа его убыли только от распада. С учётом (11) система уравнений отравления:

$$\begin{cases} \frac{dN_{Xe}}{dt} = \gamma_{Xe} \cdot \frac{q}{C} + \lambda_J \cdot N_J(t) - \lambda_{Xe}^*(q) \cdot N_{Xe}(t). \\ \frac{dN_J}{dt} = \gamma_J \cdot \frac{q}{C} - \lambda_J \cdot N_J(t). \end{cases} \quad (12)$$

Достоинство ее (сравнительно с исходной) состоит в том, что в ней фигурирует в явном и скрытом виде не величина Φ , а величина q , пропорциональная рассматриваемому уровню мощности реактора в любой момент кампании.

Стационарное отравление реактора ксеноном

Факторы, определяющие величину стационарного отравления. Стационарное отравление реактора имеет место при достаточно длительной работе реактора на постоянном уровне мощности $N_p(t) = idem$, а, следовательно, $q(t) = idem$, отчего в топливе ТВЭЛов устанавливаются стационарные концентрации J^{135} и Xe^{135} . $N_J(t) = N_J^{cm}$, $N_{Xe}(t) = N_{Xe}^{cm}$, следовательно,

$$\frac{dN_J}{dt} = \frac{dN_{Xe}}{dt} = 0$$

Подстановка этого условия в (12)-(13) дает:

$$N_{Xe}^{cm} = \frac{\gamma_J + \gamma_{Xe}}{C \cdot \lambda_{Xe} + \frac{\sigma_a^{Xe}}{\sigma_f^5 \cdot N_s^0 \cdot (1-z)}}. \quad (14)$$

Переход к величине стационарного отравления реактора приводит к выражению

$$\rho_{Xe}^{cm} = -(\gamma_J + \gamma_{Xe}) \frac{\sigma_f^5}{\sigma_a^5} \theta \times$$

$$\times \frac{1}{1 + 2.275 \cdot 10^{22} \cdot C \cdot \lambda_{Xe} \cdot \frac{\sigma_f^5}{\sigma_a^{Xe}} \cdot x \cdot \frac{1-z}{q}}. \quad (15)$$

Подстановка сюда всех известных физических констант (γ_J , γ_{Xe} , σ_f^5 , σ_a^5 , λ_J , λ_{Xe}) и постоянных для реактора величин при различных уровнях мощности и в различные моменты кампании), получаются расчетные выражения для стационарных отравлений реактора ксеноном, позволяющих построить кривые стационарных отравлений ВВЭР-1000, показанные на рис. 1.

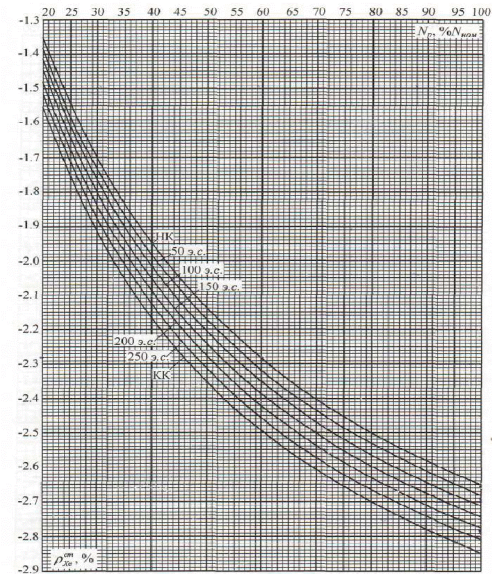


Рис. 1 Кривые стационарных отравлений ВВЭР-1000 ксеноном в некоторые моменты кампании топливной загрузки [5]

Таблица 1. Стационарные отравления ВВЭР-1000 в начале и конце кампании (ТЗ-5 ЭБ-1 ЗАЭС) [6]

N_p , % $N_{ном}$	Начало кампании		Конец кампании	
	$\rho_{Xe}^{ст. \%}$ (расчёт)	$\rho_{Xe}^{ст. \%}$ (факт.)	$\rho_{Xe}^{ст. \%}$ (расчёт)	$\rho_{Xe}^{ст. \%}$ (факт.)
10	0.838	0.84	0.990	-
20	1.351	1.35	1.552	1.554
30	1.698	1.70	1.913	1.915
40	1.948	1.95	2.166	2.167
50	2.137	2.14	2.352	2.352
60	2.281	2.28	2.495	2.494
70	2.402	2.40	2.609	2.610
80	2.500	2.50	2.700	2.701
90	2.597	2.60	2.776	2.778
100	2.650	2.65	2.850	2.848

Сравнение результатов расчета с опытными данными для пятой топливной загрузки ЭБ-1 ЗАЭС позволяет заключить, что результаты расчета практически совпадают с данными эксплуатации ВВЭР.

Переотравления реактора ксеноном

Переходный процесс изменения отравления реактора – это переход в течение определенного времени от одного уровня стационарного отравления (на исходной мощности) к другому уровню стационарного отравления (на новом уровне мощности). Качественный вид этого перехода в общем случае не является ни монотонным, ни однозначным: он определяется соотношением исходного и нового уровней мощностей реактора.

Например, если имеет место повышение уровня стационарной мощности с нулевого уровня, переходный процесс будет монотонным ростом отравления от нуля до стационарного на новом уровне мощности. Если имеет место повышение мощности не с нулевого уровня, то переходный процесс имеет характер «йодного холма». Наконец, если имеет место снижение стационарной мощности (в том числе – и до нуля), переходный процесс будет иметь характер «йодной ямы». Следовательно, самый общий случай – это случай произвольного изменения стационарного уровня мощности реактора (от N_{p1} до N_{p2}) – безотносительно к тому, какой из этих уровней больший, а какой – меньший.

Описание переотравления реактора находится из решения системы дифференциальных уравнений отравления [4]

$$\begin{cases} \frac{dN_{Xe}}{dt} = \gamma_{Xe} \cdot \frac{q_2}{C} + \lambda_J \cdot N_J(t) - \\ - \left(\lambda_{Xe} + \frac{\sigma_a^{Xe} \cdot q_2}{C \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5^0 \cdot (1-z)} \right) \cdot N_{Xe}(t). \\ \frac{dN_J}{dt} = \gamma_J \cdot \frac{q_2}{C} - \lambda_J \cdot N_J(t). \end{cases} \quad (16)$$

с соответствующими общему случаю начальными условиями: все время переходного процесса реактор работает на стационарном уровне мощности N_{p2} со средней энергонапряженностью топлива q_2 ; до момента перевода реактор длительно работал на уровне мощности N_{p1} с энергонапряженностью топлива q_1 , а поэтому концентрация ^{135}Xe в момент начала перехода ($t = 0$) – стационарная его концентрация на исходном уровне мощности, равная:

$$\begin{aligned} N_{Xe1}^{cm}(q) &= \frac{(\gamma_J + \gamma_{Xe}) \cdot q_1}{C \cdot \left[\lambda_{Xe} \cdot \frac{\sigma_a^{Xe} \cdot q_1}{C \cdot (1-z) \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5^0} \right]} = \\ &= \frac{\gamma_J + \gamma_{Xe}}{\frac{C \cdot \lambda_{Xe}}{q_1} + \frac{\sigma_a^{Xe}}{(1-z) \cdot \sigma_f^5 \cdot N_5^0}}. \end{aligned} \quad (17)$$

Общим решением системы дифференциальных уравнений (16) для определения переотравления ксеноном при переходном процессе изменения мощности ЯР от N_{p1} до N_{p2} является:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{Xe}(t)}{\rho_{Xe}^0 \theta} &= \frac{\alpha q_2}{1 + \alpha q_2} + \frac{0,9524 \alpha (q_2 - q_1)}{\alpha q_2 - 0,3667} \exp(-\lambda_J t) + \\ &+ \left[\frac{\alpha q_1}{1 + \alpha q_1} - \frac{\alpha q_2}{1 + \alpha q_2} - \frac{0,9524 \alpha (q_2 - q_1)}{\alpha q_2 - 0,3667} \right] \times \\ &\times \exp(-\lambda_{Xe}^* t). \end{aligned} \quad (18)$$

где $\alpha = \frac{\sigma_a^{Xe}}{C \lambda_{Xe} \sigma_f^5 N_5^0 (1-z)}$ – пропорциональный

множитель, величина постоянная для реактора величина (в данный момент кампании z), а $C = 3.2 \cdot 10^{-11} / V_{\text{ТК}}$, где $V_{\text{ТК}}$ – объем топлива в твэле.

При выходе разотравленного реактора на стационарное отравление (случай $q_1 = 0$):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{Xe}(t)}{\rho_{Xe}^0 \theta} &= \frac{\alpha q_2}{1 + \alpha q_2} + \frac{0,9524 \alpha q_2}{\alpha q_2 - 0,3667} \exp(-\lambda_J t) - \\ &- \left[\frac{\alpha q_2}{1 + \alpha q_2} + \frac{0,9524 \alpha q_2}{\alpha q_2 - 0,3667} \right] \exp(-\lambda_{Xe}^* t). \end{aligned} \quad (19)$$

В табл. 2 показаны результаты расчета нестационарных отравлений по формуле (20) (верхние значения отравлений в ячейках таблицы) и соответствующие величины отравлений, взятых из альбомов нейтронно-физических характеристик различных топливных загрузок серийных реакторов ВВЭР-1000 (В-320) четырех АЭС (Калининской, Запорожской, Хмельницкой и Ровенской) [7].

Переотравление стационарно отравленного реактора после его останова (случай $q_2 = 0$):

$$\begin{aligned} \frac{\rho_{Xe}(t)}{\rho_{Xe}^0 \theta} &= 0,9524 \cdot \frac{\alpha q_1 \lambda_{Xe}}{\lambda_{Xe} - \lambda_J} \exp(-\lambda_J t) + \\ &+ \left[\frac{\alpha q_1}{1 + \alpha q_1} + 0,9524 \frac{\alpha q_1 \lambda_{Xe}}{\lambda_J - \lambda_{Xe}} \right] \exp(-\lambda_{Xe} t). \end{aligned} \quad (20)$$

Таблица 2. Текущие отравления ксеноном в первые 3 суток работы изначально разотравленного ВВЭР-1000 на стационарных уровнях мощности. [7].

t, ч	20%	40%	60%	80%	100%
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	- 0.168 - 0.17	- 0.307 - 0.308	- 0.426 - 0.428	- 0.528 - 0.539	- 0.615 - 0.616
10	- 0.438 - 0.438	- 0.759 - 0.76	- 1.001 1.02	- 1.188 - 1.19	- 1.333 - 1.33
15	- 0.692 - 0.695	- 1.146 - 1.15	- 1.457 - 1.46	- 1.679 - 1.68	- 1.841 - 1.84
20	- 0.895 - 0.90	- 1.429 - 1.43	- 1.769 - 1.77	- 2.000 - 2.00	- 2.162 - 2.16
25	- 1.045 - 1.05	- 1.620 - 1.62	- 1.969 - 1.97	- 2.198 - 2.20	- 2.358 - 2.36
30	- 1.150 - 1.15	- 1.745 - 1.75	- 2.093 - 2.10	- 2.319 - 2.32	- 2.475 - 2.48
40	- 1.267 - 1.27	- 1.872 - 1.87	- 2.215 - 2.20	- 2.435 - 2.44	- 2.588 - 2.59
50	- 1.318 - 1.32	- 1.920 - 1.92	- 2.259 - 2.60	- 2.477 - 2.48	- 2.628 - 2.63
60	- 1.338 - 1.34	- 1.937 - 1.94	- 2.275 - 2.28	- 2.491 - 2.50	- 2.642 - 2.64
75	- 1.348 - 1.35	- 1.946 - 1.95	- 2.282 - 2.28	- 2.498 - 2.51	- 2.648 - 2.65

Таблица 3. Переходные процессы на ^{135}Xe после разового подъема с указанной мощности до 100%. [7]

t, ч	20	40	60	80
0	- 1.351 - 1.35	- 1.948 - 1.50	- 2.284 - 2.28	- 2.500 - 2.50
2	- 1.132 - 1.13	- 1.665 - 1.66	- 2.052 - 2.05	- 2.372 - 2.37
4	- 1.159 - 1.16	- 1.620 - 1.62	- 1.997 - 2.00	- 2.337 - 2.34
6	- 1.296 - 1.30	- 1.685 - 1.69	- 2.027 - 2.03	- 2.348 - 2.35
8	- 1.470 - 1.47	- 1.795 - 1.80	- 2.093 - 2.09	- 2.378 - 2.38
10	- 1.647 - 1.65	- 1.916 - 1.92	- 2.168 - 2.17	- 2.414 - 2.41
12	- 1.810 - 1.81	- 2.031 - 2.03	- 2.243 - 2.24	- 2.450 - 2.46
14	- 1.954 - 1.95	- 2.135 - 2.14	- 2.310 - 2.31	- 2.483 - 2.48
16	- 2.076 - 2.08	- 2.224 - 2.22	- 2.369 - 2.70	- 2.511 - 2.51
20	- 2.265 - 2.27	- 2.363 - 2.36	- 2.460 - 2.46	- 2.556 - 2.56
25	- 2.419 - 2.42	- 2.477 - 2.48	- 2.536 - 2.54	- 2.594 - 2.59
30	- 2.512 - 2.51	- 2.547 - 2.55	- 2.582 - 2.58	- 2.616 - 2.62
40	- 2.601 - 2.60	- 2.613 - 2.61	- 2.626 - 2.63	- 2.638 - 2.64
50	- 2.632 - 2.63	- 2.637 - 2.64	- 2.641 - 2.64	- 2.646 - 2.64
60	- 2.644 - 2.64	- 2.645 - 2.64	- 2.647 - 2.65	- 2.648 - 2.65
70	- 2.648 - 2.65	- 2.648 - 2.65	- 2.649 - 2.65	- 2.649 - 2.65

Сравнение рассчитанных величин с данными альбомов НФХ загрузок активных зон реакторов ВВЭР-1000 дало сходимость их величин с относительной погрешностью не более $\pm 0.55\%$.

Таблица 4. Таблица значений текущих отравлений после останова стационарно отравленного ВВЭР на указанных уровнях мощности. [7].

t, ч	20%	40%	60%	80%	100%
0	-1.351 -1.35	-1.948 -1.95	-2.284 -2.28	-2.500 -2.50	-2.650 -2.65
2	-1.419 -1.42	-2.184 -2.18	-2.721 -2.72	-3.155 -3.16	-3.525 -3.53
4	-1.430 -1.43	-2.291 -2.29	-2.956 -2.96	-3.530 -3.53	-4.045 -4.05
6	-1.400 -1.40	-2.307 -2.31	-3.042 -3.04	-3.700 -3.70	-4.302 -4.30
8	-1.342 -1.34	-2.257 -2.26	-3.023 -3.02	-3.722 -3.72	-4.370 -4.37
10	-1.267 -1.27	-2.163 -2.16	-2.931 -2.93	-3.640 -3.64	-4.302 -4.30
12	-1.181 -1.18	-2.041 -2.04	-2.789 -2.79	-3.487 -3.49	-4.142 -4.11
16	-0.997 -1.00	-1.754 -1.75	-2.428 -2.43	-3.064 -3.06	-3.665 -3.67
20	-0.820 0.82	-1.460 -1.46	-2.037 -2.04	-2.587 -2.59	-3.108 -3.11
25	-0.624 -0.62	-1.124 -1.12	-1.580 -1.58	-2.016 -2.02	-2.432 -2.43
30	-0.465 -0.47	-0.844 -0.84	-1.192 -1.19	-1.527 -1.52	-1.847 -1.85
40	-0.247 -0.25	-0.452 -0.45	-0.643 -0.64	-0.828 -0.83	-1.005 -1.01
50	-0.126 -0.13	-0.232 -0.23	-0.332 -0.33	-0.428 -0.43	-0.521 -0.52
60	-0.063 -0.06	-0.116 -0.12	-0.166 -0.17	-0.215 -0.22	-0.262 -0.26
70	-0.031 -0.03	-0.057 -0.06	-0.082 -0.08	-0.106 -0.11	-0.129 -0.13

Заключение

На основе системы дифференциальных уравнений кинетики отравления ЯР ксеноном-135 получены выражения для величин стационарного отравления ВВЭР-1000 в зависимости от мощности ЯР, начального обогащения топлива, степени выгорания топлива. С учетом коррекции выражений вследствие изменчивости коэффициента использования тепловых нейтронов в процессе кампании получены расчетные формулы для стационарных отравлений реактора. Сравнение расчетных величин с данными использованными в практике эксплуатации ВВЭР-100 дает возможность заключить, что

первые отличаются от вторых не более чем на $\pm 0,1\%$.

Выполнено решение системы дифференциальных уравнений отравления для основных нестационарных режимов работы реактора, а именно:

- выход первоначально разотравленного реактора на стационарное отравление при работе ЯР на постоянном уровне мощности;

- переотравление реактора с подъемом мощности от произвольного уровня до номинальной;

- переотравление реактора после снижения мощности реактора от номинальной до произвольного уровня, в том числе и до полного его останова.

Расчет по полученным выражениям переходных процессов и сопоставление величин нестационарных отравлений с величинами, используемыми в практике эксплуатации серийных ВВЭР-1000 на АЭС, позволяет заключить, что переходные процессы в обоих случаях практически идентичны - с погрешностью не более $\pm 0,2\%$.

На основе выполненных расчетов и сравнения их результатов с данными более 30 топливных загрузок украинских АЭС с ВВЭР-1000. В СНУЯЭиП создан учебный альбом нейтронно-физических характеристик серийного ВВЭР-1000, широко используемый при обращении студентов для подготовки специалистов АЭС.

Список литературы

1. Гордеев И.В. Ядерно-физические константы/ Карандашев Д.А., Малышев А.В. Справочник – М.: Атомиздат, 1983. – 507с.
2. Саркисов А.А. Физика переходных процессов в ядерных реакторах / В.Н.Пучков - М.: Атомиздат, 1983. – 231с.
3. Шипачев В.С. Курс высшей математики / В.С. Шипачев – 3-е изд.-М.:ОНИКС. 2007. – 600с.
4. Мерзлякин Г.Я. Основы теории реакторов / Севастополь: СНУЯЭиП, 2011. – 450 с. (с.353–372)
5. Нейтронно-физические характеристики серийного реактора ВВЭР-1000 (В-320). Учебный альбом. Севастополь: СНУЯЭиП, 2011. –32 с.(с.15–23)
6. Карта уставок аварийных и предупредительных защит IT-YS KU.01A. ЗАЭС, 2016. – 551 с.
7. Карта уставок технологических защит и блокировок РО ЭБ №5 0500.KU.01B. ЗАЭС, 2005.- 287 с.

References

1. Gordeev V. I. Nuclear physical constants / Karandashev D. A., Malyshev A. V. Handbook – M.: Atomizdat, 1983. – 507 p.
2. Sarkisov, A. A. Physics of transients in nuclear reactors / V. N. Puchkov. – M.: Atomizdat, 1983. – 231 p.
3. Shipachev V.S. Course of higher mathematics/ V.S. Shipachev – 3-., – M.:ONIX, 2007 - 600 p.
4. Merzlikin G. J. fundamentals of the theory reactors / Sevastopol: SUNEI, 2011. – 450p. (p.353–372)
5. Neutron-physical characteristics of the series tion of the VVER-1000 (V-320). Educational album. Sevastopol: SUNEI, 2011. – 32 p. (p.15–23)
6. Map settings the emergency and warning protection IT-YS KU.01A. Zaporizhzhya, 2016. – 551 p.
7. Card setting process protections and blocks rook RO No. 5 0500.KU.01V. Zaporizhzhya, 2005. - 287 p.

УДК 621.039.587

Разработка и верификация расчетной модели СПОТ ПГ для РУ АЭС с ВВЭР-1000/В-320

И.И. Свириденко¹, Д.В. Шевелев²¹ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, i.sviridenko@mail.ru

²АО «ВНИИАЭС», ул. Ферганская, 25, г. Москва, 109507, Россия, am5x86@mail.ru

Статья поступила 26.09.2016 г.; после доработки 28.09.2016 г.

Аннотация

Рассмотрена расчетная модель системы пассивного отвода остаточного тепловыделения (СПОТ) реакторной установки (РУ) АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР). СПОТ обеспечивает отвод теплоты от теплоносителя первого контура к конечному поглотителю через парогенератор (ПГ). Модель СПОТ ПГ разработана на базе верифицированной модели РУ АЭС с ВВЭР-1000/В-320 (энергоблока ХАЭС-1) с использованием кода RELAP5Mod3.4. С помощью модели СПОТ ПГ для указанной модификации РУ получены расчетные характеристики режима аварийного отвода теплоты от РУ в условиях полного длительного обесточивания. Проведена верификация разработанной модели. Полученные расчетные характеристики СПОТ ПГ позволяют проводить сравнение эффективности функционирования пассивных систем, выполняющих одинаковые функции безопасности, но различных по принципу действия, независимых, функционально и физически разделенных друг от друга.

Ключевые слова: АЭС с ВВЭР, безопасность, полное длительное обесточивание, СПОТ ПГ, расчетная модель.

Development and verification of the PRHRS SG numerical model for NPP with WWER-1000/V-320

I.I. Sviridenko, D.V. Shevelev

Sevastopol State University, Sevastopol, 299053, Russia, i.sviridenko@mail.ru

²OJSC "VNIIAES", 25 Ferganskaya st., g. Moscow, 109507, Russia, am5x86@mail.ru

Received 26.09.2016 y.; received in final form 28.09.2016 y.

Abstract

The numerical model of passive residual heat removal system (PRHRS) analyzed for the nuclear plant with WWER type nuclear steam supply system (NSSS). PRHRS provides the residual heat transfer from the primary circuit to the end sink through steam generators (SG). The PRHRS SG model developed on the basis of the verified model of NSSS WWER-1000/V-320 (Khmelnitsky-1 power unit) for RELAP5/Mod3.4 code. Using the PRHRS SG model for that unit the design parameters obtained for the emergency heat removal from the NSSS under the conditions of complete long term power unit blackout. The verification of the developed model completed. Obtained design parameters of PRHRS SG allow performing the comparison of effectiveness for passive system operation providing the same safety function but different by operation principles and separated functionally and physically each from another.

Keywords: NPP with WWER, safety, complete long term blackout, PRHRS SG, numerical model.

Введение

Одним из методов обеспечения безопасности реакторных установок (РУ) в условиях ава-

рии с полным длительным обесточиванием АЭС является применение пассивной системы отвода остаточного тепловыделения (СПОТ). При разработке СПОТ для легководных реакторов LWR

используют два основных подхода, отличающихся организацией отвода теплоты от разных элементов РУ.

Первый подход предусматривает формирование СПОТ с использованием основного оборудования РУ – парогенератора (ПГ) как промежуточного теплообменника расхолаживания. Этот подход уже реализован в отечественных проектах АЭС с ВВЭР-1000 и 1200 поколения РУ 3+, а также предусмотрен в проектах ВВЭР-ТОИ и РУ АЭС средней мощности с ВВЭР-640.

Горизонтальный ПГ в российских РУ с ВВЭР обеспечивает надежный, эффективный и долговременный отвод теплоты от первого контура через второй контур к конечному поглотителю: атмосферному воздуху либо выкипающей воде в баке, расположенном за пределами гермообъема (ГО).

Особенностью второго подхода является отвод теплоты непосредственно от теплоносителя первого контура. Этот вариант использует американская компания Westinghouse Electric в своих проектах РУ AP-1000/600.

Созданию эффективной и надежной СПОТ, обеспечивающей отвод теплоты от первого контура РУ АЭС с ВВЭР, посвящены разработки Севастопольского государственного университета [1]. Отличительной особенностью этого варианта СПОТ является использование теплообменного оборудования на основе испарительно-конденсационных устройств замкнутого типа – двухфазных термосифонов (ДТС), применение которых обеспечивает эффективность, надежность и безопасность отвода теплоты от активной зоны. С использованием термосифонного теплообменного оборудования разработана СПОТ для отвода теплоты от первого контура (СПОТ Р) и система пассивного расхолаживания компенсатора давления (СПР КД).

Расчетное моделирование СПОТ Р и СПР КД было проведено с использованием кода RELAP5Mod3.4 на верифицированной модели РУ АЭС с ВВЭР-1000/В-320 (ХАЭС-1). Для сравнения эффективности предложенных СПОТ Р и СПР КД с характеристиками СПОТ ПГ, необходимо было разработать модель СПОТ ПГ для РУ В-320.

Целью работы является разработка модели СПОТ ПГ для РУ АЭС с ВВЭР-1000/В-320 и проведение ее верификации. Получение расчетных характеристик СПОТ ПГ для указанной модификации РУ позволяет выполнить корректное сравнение эффективности отвода остаточного тепловыделения пассивными системами, выполняю-

щими одинаковые функции безопасности, но различными по принципу действия, независимыми, функционально и физически разделенными друг от друга.

Соблюдение этих условий обеспечит выполнение новых «Требований европейских энергетических компаний к АЭС с легководными реакторами» (EUR, октябрь 2012 г.) [2] по диверсификации систем безопасности, что определяет актуальность настоящей работы.

Расчетная схема СПОТ ПГ

В расчетной модели СПОТ ПГ принята 4-х петлевая компоновка. На рис. 1 изображена нодализационная схема разработанной модели с одной петлей СПОТ ПГ.

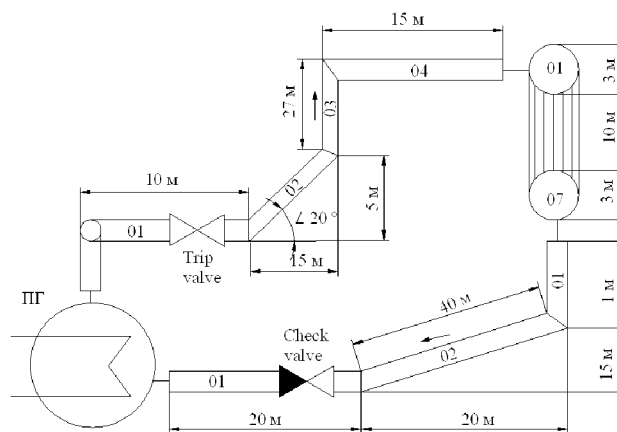


Рис. 1. Упрощенная нодализационная схема СПОТ ПГ (показана одна петля)

Схема включает три основных компонента.

1) Паропровод СПОТ ПГ – от врезки в паропровод острого пара за пределами ГО до быстродействующего запорно-отсечного клапана в пределах обстройки (помещение А-820) у входа во входной коллектор теплообменника-конденсатора (ТК). Паропровод СПОТ ПГ представлен 4-мя участками. Длина первого участка (01), включая главный пусковой клапан (ГПК) СПОТ ПГ (Trip valve), составляет 10 м. Затем следуют несколько участков различной длины и наклона (на схеме: 02, 03, 04). Принятая в модели конфигурация этих участков позволяет учесть различные режимы течения насыщенного пара и пароводяной смеси при работе СПОТ ПГ, а также влияние местных гидравлических сопротивлений (гибы, разветвления, переходы и т.п.) в реальной трассировке.

2) Теплообменник-конденсатор, включающий паровой коллектор (01) с входными участ-

ками теплообменных трубок, пучок теплообменных трубок (в модели трубки разбиты по длине на 5 расчетных участков: с 02 по 06) и сборный коллектор конденсата (07).

3) Конденсатный трубопровод – от сборного коллектора ТК до врезки в трубопроводы питательной воды ПГ за пределами ГО. Невозвратный клапан Check valve является эквивалентом группы отсечных арматур, нормально открытых при вводе системы в действие. Детальная конфигурация выбрана таким образом, чтобы, с учетом единичного отказа в самом канале (например, неоткрытие любой из арматур), имелось хотя бы одно подключение в трубопровод питательной воды (основной, вспомогательной, аварийной), не отсекаемое от ПГ. Невозвратные клапаны Check valve предусмотрены на случай возможных течей в системе. Наличие нескольких участков позволяет моделировать различные режимы течения вдоль конденсатного трубопровода при срабатывании системы. Трассировка подбиралась таким образом, чтобы исключить возможность образования гидрозатворов в контуре СПОТ ПГ в любом из режимов: ожидание, работа.

Исходное состояние РУ и сценарии моделируемых аварий

При моделировании принято следующее исходное состояние РУ.

РУ работает в стационарном режиме на номинальной мощности, топливная загрузка – стационарная для 4-годичной кампании, период эксплуатации – конец кампании топливной загрузки. СПОТ находится в состоянии ожидания.

Потеря электроснабжения собственных нужд происходит на десятой секунде моделируемого процесса.

Имитируются срабатывание аварийной защиты реактора, выбег главного циркуляционного и турбопитательного насосов (интервалы времени – реальные по блочным данным ХАЭС-1).

Активные системы безопасности не работают в течение всего переходного процесса. Вся арматура с электроприводом, включая регулирующие, запорные и паросбросные клапаны с первой секунды процесса – неработоспособна. Быстродействующие редуцирующие устройства со сбросом пара в атмосферу, конденсатор и коллектор собственных нужд закрыты.

Единственным доступным источником ввода борной кислоты в первый контур являются гидроемкости системы аварийного охлаждения активной зоны (ГЕ САОЗ).

Вся арматура пружинного типа с непосредственным управлением от давления рабочей среды: предохранительные клапаны (ПК) ПГ и компенсатора давления (КД) в течение всего моделируемого процесса остаются работоспособными, открытие и закрытие происходит по уставкам срабатывания, соответствующим нормативам РУ с ВВЭР-1000/В-320. При посадке ПК после каждого сброса давления обеспечивается герметичность защищаемых ими систем.

Выход пара из ПГ по каналам нормальной эксплуатации прекращается. Импульсно-предохранительные устройства (ИПУ) ПГ срабатывают по уставкам.

Исходное состояние остальных элементов РУ во всех моделируемых сценариях аварии соответствует регламенту нормальной эксплуатации РУ с ВВЭР-1000/В-320.

Имитируется отвод остаточного тепловыделения активной зоны с мощностью, соответствующей худшему возможному варианту: уровню, достигаемому на конец кампании топливной загрузки реактора.

Состояние «ожидания» СПОТ ПГ рассматривается в двух режимах: зимнем и летнем. Зимнее состояние сопровождается постоянной продувкой ТК через байпас ГПК СПОТ для предотвращения замерзания конденсата в условиях низких температур. Летнее состояние ожидания обеспечивается без продувки ТК.

Ввод в действие всех четырех петель СПОТ ПГ в модели происходит одновременно. Момент подключения СПОТ ПГ к РУ выбран из условия гарантированного недопущения открытия ИПУ КД, так как в случае возможной его последующей неполадки начнется течь первого контура без подпитки, что существенно усложнит протекание рассматриваемого аварийного процесса.

СПР КД вводится в действие через 600 с после открытия ГПК СПОТ.

Задача расчетного моделирования – установить характер аварийного процесса, определить состояние активной зоны в рассматриваемых условиях, выявить влияние различных факторов на возможное нарушение пределов безопасной эксплуатации.

В проведенном расчетном моделировании рассматриваются два основных сценария развития аварии.

Первый сценарий. Исходное событие аварии (ИСА) – полное длительное обесточивание с отказом всех АДГ. Плотный первый контур, подключение всех петель СПОТ ПГ, подключение одного канала СПР КД, подключение ГЕ по уставкам.

Второй сценарий. Режим тепловой защиты конечного поглотителя от замерзания. ИСА – полное длительное обесточивание РУ с отказом всех АДГ. Плотный первый контур, подключение четырех петель СПОТ ПГ, подключение одного канала СПР КД, подключение ГЕ по уставкам.

Во всех рассматриваемых сценариях предполагается отсутствие какого-либо вмешательства со стороны оперативного персонала в протекание аварийного процесса, с одним лишь предусмотренным действием штатных защит, блокировок и части систем безопасности.

Начальные и граничные условия

При моделировании работы СПОТ ПГ приняты следующие начальные и граничные условия.

Начальная мощность РУ: номинальная, стационарный режим.

Топливная загрузка: стационарная 4-годичная, ~280 эфф. суток (концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура близка к нулю).

Полное обесточивание энергоблока: в момент начала расчета.

Все активные системы безопасности РУ неработоспособны.

Подключение СПОТ ПГ: при росте давления в первом контуре до величины, ниже уставки срабатывания контрольного ИПУ КД на 0,6 МПа.

Регулирование теплоотвода каналами СПОТ ПГ не предусмотрено.

Максимальная тепловая мощность, отводимая СПОТ ПГ при температуре теплоносителя первого контура +320 °С на выходе из активной зоны, составляет не менее 80 МВт (по 20 МВт на канал).

При отладке модели, работа СПР КД и СПОТ Р не рассматривались (проверялась корректность моделирования СПОТ ПГ, проводился анализ чувствительности и т.д.). В дальнейших расчетах с целью гарантированного предотвращения выхода реактора на повторную критичность учитывалась работа одного канала СПР КД.

В приведенных ниже расчетах дополнительные отказы пассивных систем безопасности не учитываются.

В варианте без работы пассивных систем безопасности расчет останавливался после открытия контрольного ИПУ КД (начало потери теплоносителя первого контура при высоких параметрах в контуре, подпитка от ГЕ САОЗ невозможна).

Верификация расчетной модели

В качестве исходной расчетной модели РУ использована верифицированная модель РУ АЭС с ВВЭР-1000/В-320 энергоблока ХАЭС-1, предназначенная для реалистических расчетов поведения РУ при анализе запроектных аварий. Эта расчетная модель была модифицирована путем включения в нее дополнительных моделей СПОТ Р и СПР КД. Выполненные с использованием уже модифицированной модели многочисленные расчеты различных аварийных режимов продемонстрировали ее корректность и работоспособность пассивных систем [3]. В эту модифицированную модель была добавлена модель четырех каналов СПОТ ПГ.

Верификация модели СПОТ ПГ проводилась в четыре этапа. На первом этапе для представительного набора сценариев были выполнены стандартные расчеты переходных процессов: как без работы пассивных систем безопасности, так и с ними, но без ввода в действие СПОТ ПГ. Полученные результаты подтвердили отсутствие влияния отключенных СПОТ ПГ на развитие переходных и аварийных процессов.

На втором этапе проведена серия расчетов работы только СПОТ ПГ с определением характеристик теплоотвода и их соответствия известным из доступных источников результатам моделирования, а также с целью проверки устойчивости дополненной модели.

На третьем этапе была исследована и минимизирована чувствительность результатов к нодализации (при сохранении устойчивости), а также выполнена минимизация накопления интегральных ошибок по массе теплоносителя при плотных контурах и при значительной протяженности расчета.

Изменение количества расчетных участков схемы, изображенной на рис. 1, не приводило к изменению результатов расчета. При этом расчет можно было производить с максимально допустимым шагом (предел Куранта) при использовании полунявного алгоритма, а при использовании неявного алгоритма – с шагом, в несколько раз больше. Изменение алгоритма также не влияло на получаемые результаты.

Наконец, на четвертом этапе проверена устойчивость и физическая корректность поведения модели при работе всех пассивных систем безопасности в их различных конфигурациях. Накопления ошибки по массе не происходило, автоматического уменьшения шага расчета не наблюдалось.

Результаты расчетного моделирования

Результаты расчетного моделирования режима аварийного теплоотвода с работой всех четырех каналов СПОТ ПГ по первому сценарию моделируемого процесса для условий полного длительного обесточивания энергоблока АЭС с ВВЭР1000/В-320 с отказом всех аварийных источников электроснабжения собственных нужд, полученные на модифицированной модели, представлены на рисунках 2 – 9.

Ввод СПОТ ПГ в действие происходит через 45 минут после ИСА при достижении давления первого контура значения 17,8 МПа (рис. 2). Указанная величина ниже уставки открытия контрольного ИПУ КД на 0,6 МПа с учетом максимально возможной суммарной погрешности настройки давления открытия клапана. Таким образом, выбран наиболее поздний момент подключения СПОТ ПГ, когда срабатывание ИПУ КД еще гарантированно не происходит. Температура теплоносителя в первом контуре за это время успевает вырасти, а мощность остаточного энерговыделения в топливе снижается. Такое состояние РУ позволяет оценить максимальную скорость ее расхолаживания на начальном этапе работы СПОТ ПГ и сравнить с максимально допустимой (60 град/час за любые 2 часа).

Характер изменения давления в первом контуре модели РУ ВВЭР1000/В-320 при подключении СПОТ ПГ (рис. 2) соответствует характеру изменения давления для условий РУ ВВЭР-1000/В-392 [4]. Более позднее начало снижения давления в модели В-320 связано с тем, что СПОТ ПГ подключается позже: через ~3000 секунд после ИСА. В расчете для В-392 СПОТ ПГ вводится в режим расхолаживания на 1800-й секунде.

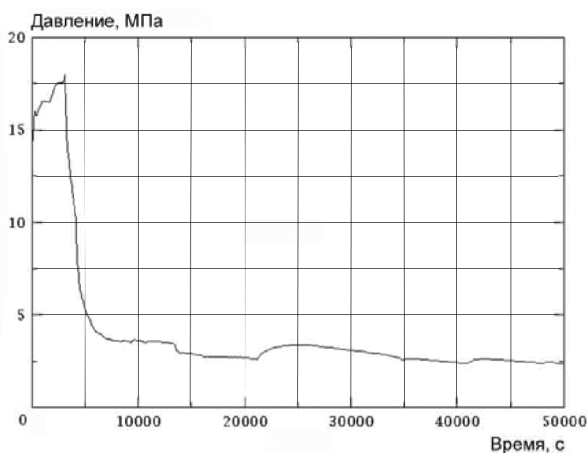


Рис. 2. Давление теплоносителя первого контура (в работе 4 канала СПОТ ПГ)

Несмотря на то, что в модели В-320 к СПОТ ПГ добавлена СПР КД, ввод в действие последней предусмотрен через 10 минут после подключения СПОТ ПГ, то есть между 3300-й и 3600-й секундами. Кроме того, вклад СПР КД в общий теплоотвод от РУ по сравнению с суммарной мощностью, отводимой СПОТ ПГ, пренебрежимо мал и не превышает 1,2 МВт в начальный период работы [3].

Следует также отметить, что принятое в рассматриваемом сценарии подключение только одного канала СПР КД вместо двух несколько замедляет темп снижения давления в первом контуре. Поэтому подключение ГЕ САОЗ и ввод бора в первый контур начинаются позже. Таким образом в модели В-320 удалось сформировать более неблагоприятные условия для возникновения повторной критичности в активной зоне.

Характер изменения температуры первого контура в модели В-320 (рис. 3) также соответствует характеристикам модели В-392 со СПОТ ПГ [4].

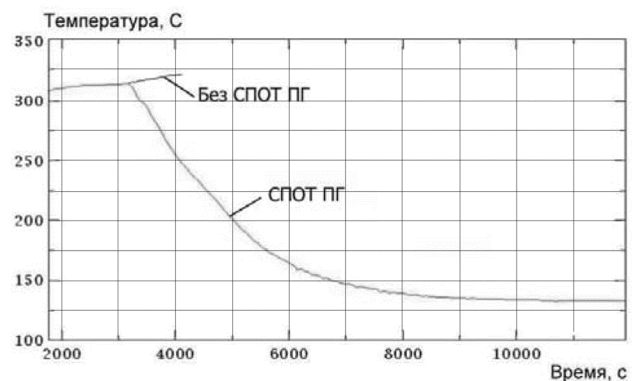


Рис. 3. Температура теплоносителя первого контура на выходе из активной зоны (в работе 0 или 4 канала СПОТ ПГ)

После снижения давления в первом контуре до 6,0 МПа борный концентрат из ГЕ САОЗ начинает поступать в реактор. Рост концентрации борной кислоты в активной зоне обусловлен срабатыванием ГЕ САОЗ (рис. 4). За счет этого при расхолаживании РУ дальнейшего снижения подкритичности после ~7000 секунды с момента ИСА не происходит. Активная зона остается подкритичной с отрицательной реактивностью по абсолютной величине, не менее $4,8 \cdot \beta_{эфф}$ за все расчетное время (рис. 5).

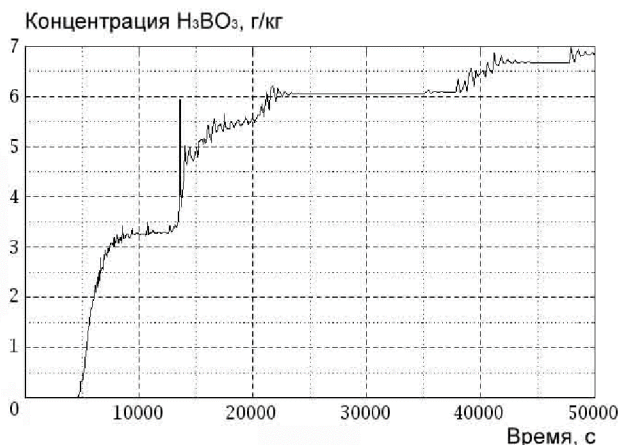


Рис. 4. Концентрация борной кислоты в теплоносителе, заполняющем активную зону

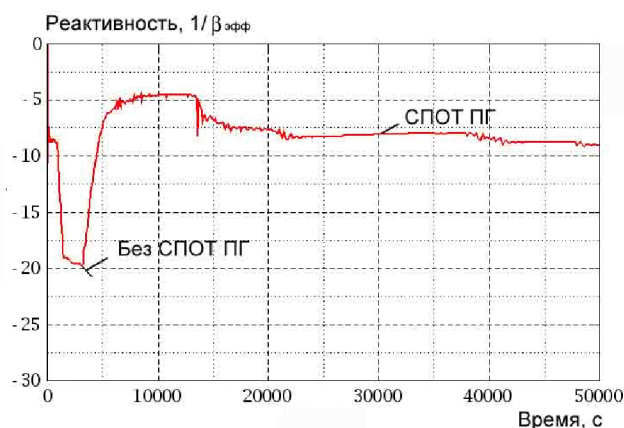


Рис. 5. Реактивность активной зоны с учетом борной кислоты, поданной в первый контур из ГЕ САОЗ

Изменение уровня в ПГ в модели В-320 при аварийном теплоотводе без СПОТ ПГ (рис. 6, а) соответствует аналогичному режиму модели В-392 [4]. На начальном этапе переходного процесса и после ввода в действие СПОТ ПГ в модели В-320 наблюдается просадка уровня до 1 м с последующим его восстановлением до 1,5 м (рис. 6, б). Просадка уровня в ПГ до ввода в действие СПОТ ПГ связана с работой паросбросных устройств второго контура (первые 40...45 минут процесса), а также за счет заполнения паром второго контура объема петель СПОТ ПГ (5...10 минут после ввода СПОТ ПГ в действие).

СПОТ ПГ модели В-392 в режиме ожидания постоянно подключена к ПГ, поэтому подобного резкого колебания уровня в ПГ при вводе СПОТ ПГ в действие не наблюдается [4].

После того, как режим работы СПОТ ПГ стабилизируется (рис. 6, б), часть питательной воды, оставшейся в трубопроводах питательной воды, перемещается в ПГ и уровень в нем не-

сколько возрастает. Это связано с тем, что вода в трубопроводах питательной воды с температурой выше, чем температура насыщения в ПГ (результат расхолаживания ПГ), частично вскипает и, попадая в ПГ, конденсируется. Дальнейшее незначительное снижение уровня, с последующей стабилизацией, обусловлено ростом плотности воды с понижением температуры.

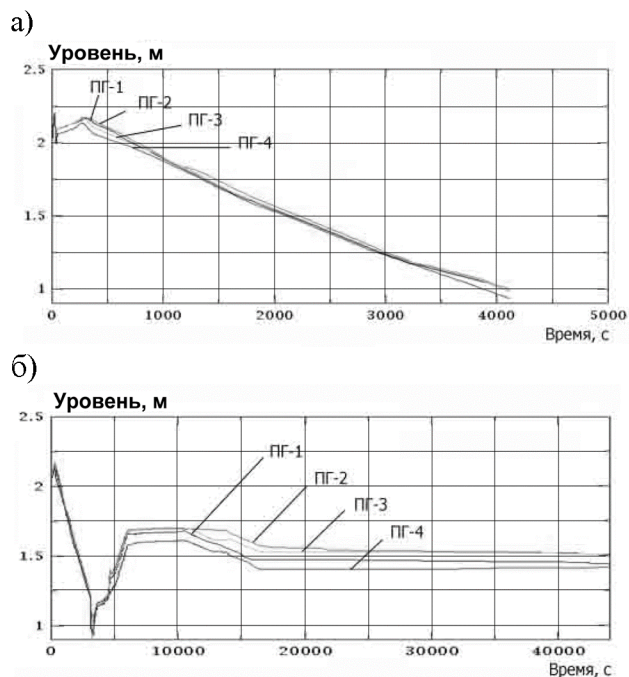


Рис. 6. Уровень котловой воды в ПГ:

а) – СПОТ ПГ отключены; б) – СПОТ ПГ в работе

Теперь рассмотрим процесс изменения уровня в КД (рис. 7.). До ввода СПОТ ПГ в действие уровень теплоносителя в КД растет. Это связано с постепенным снижением уровня котловой воды в ПГ, частичным оголением трубки и сокращением эффективной поверхности теплообмена с соответствующим ухудшением теплоотвода от первого контура.

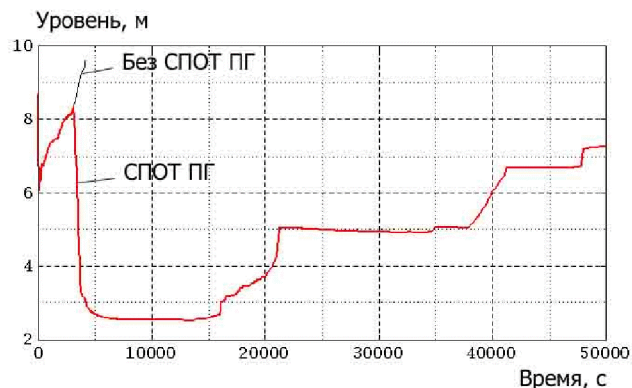


Рис. 7. Уровень теплоносителя в КД

В результате, средняя температура теплоносителя первого контура повышается, а плотность снижается, что приводит к росту объема теплоносителя в КД.

После ввода в действие СПОТ ПГ начинается снижение параметров в первом контуре. Часть теплоносителя из КД перемещается в главный циркуляционный трубопровод (ГЦТ) и реактор, часть – испаряется, увеличивая паровой объем в КД. Уровень теплоносителя в КД снижается. После ~5000 секунды переходного процесса, давление в первом контуре становится ниже, чем в ГЕ САОЗ и последние подключаются к первому контуру.

Срабатывание ГЕ САОЗ приводит вначале к стабилизации уровня в КД, а затем после ~13000 секунды и к постепенному восстановлению уровня теплоносителя в нем.

Расход теплоносителя в петлях ГЦТ (рис. 8) определяется движущим напором естественной циркуляции в первом контуре. Этот напор связан с тепловым расширением теплоносителя и, следовательно, разностью гидростатических давлений в реакторе и в коллекторах ПГ. Иными словами, определяется подогревом теплоносителя в реакторе и охлаждением в ПГ.

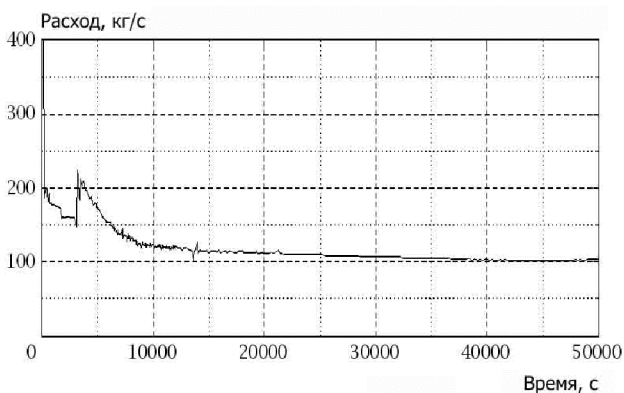


Рис. 8. Расход теплоносителя в петле ГЦТ

До ввода СПОТ ПГ в действие, подогрев теплоносителя в реакторе уменьшается по мере снижения остаточного энерговыделения в топливе. В то же время, из-за снижения уровня в ПГ, уменьшается и захлаживание теплоносителя в его трубчатке, и разность температур между коллекторами ПГ. Все это приводит к снижению движущего напора естественной циркуляции и, как следствие, расхода теплоносителя первого контура в петлях ГЦТ.

После ввода СПОТ ПГ в действие, давление в ПГ резко снижается, падает температура насыщения и захлаживание теплоносителя в

трубчатке возрастает. Возрастает и движущий напор ЕЦ. Расход теплоносителя в петлях ГЦТ возрастает, примерно, на треть.

В дальнейшем, после выхода СПОТ ПГ на квазистационарный режим работы в условиях постоянного снижения остаточного энерговыделения, расход теплоносителя в петлях ГЦТ плавно снижается и стабилизируется на практически постоянном уровне ~100 кг/с (в каждой петле).

На рис. 9 показано изменение расхода теплоносителя второго контура в петле СПОТ ПГ (возврат конденсата из ТК в ПГ). До ввода СПОТ ПГ этот расход равен нулю. Ввод в работу СПОТ ПГ приводит к резкому начальному снижению давления в ПГ. Котловая вода интенсивно вскипает, влажный водяной пар заполняет петлю СПОТ ПГ и ТК. Из-за все еще высоких параметров пара в ПГ и его интенсивной конденсации в ТК, образуется значительное количество конденсата, который сливается в ПГ. Начальный расход конденсата в контуре СПОТ ПГ достигает 25 кг/с.

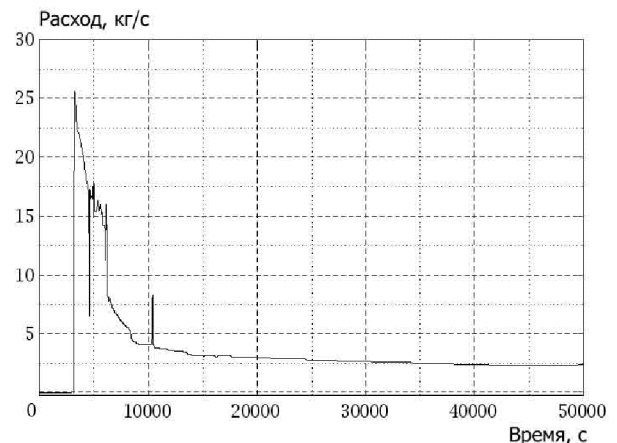


Рис. 9. Расход теплоносителя по контуру расхолаживания СПОТ ПГ (возврат конденсата)

После прогрева ТК интенсивность конденсации пара падает и расход конденсата снижается до ~15 кг/с. С подачей относительно холодного борного концентрата из ГЕ САОЗ в реактор снижается температура теплоносителя первого контура в горячих петлях ГЦТ, что приводит к снижению теплоотвода через ПГ. При этом расход в контуре СПОТ ПГ снижается до величины ~5..7 кг/с.

В дальнейшем, по мере снижения остаточного энерговыделения в активной зоне и его теплоотвода через ПГ, расход среды в контуре СПОТ ПГ плавно снижается и стабилизируется на уровне ~2,5 кг/с.

Таким образом, приведенные результаты расчетного моделирования подтверждают работоспособность и корректность разработанной модели СПОТ ПГ для РУ с В-320. Полученные результаты хорошо коррелируют с результатами расчетов, полученными другими авторами и представленными в [4].

Применение СПР КД в сочетании со СПОТ ПГ обеспечивает достаточный запас подкритичности активной зоны РУ В-320 за счет использования только ГЕ САОЗ. Это позволяет при расхолаживании РУ при помощи СПОТ ПГ отказаться от увеличения суммарной эффективности органов регулирования системы управления и защиты реактора, а также от использования дополнительной пассивной системы быстрого ввода бора.

Заключение

Разработка расчетной модели СПОТ ПГ для РУ с ВВЭР-1000/В-320 позволила получить основные характеристики РУ при запроектной аварии АЭС с полной длительной потерей электроснабжения собственных нужд и отказом аварийных источников электроэнергии.

Подтверждена устойчивость модифицированной модели СПОТ ПГ с низкой чувствительностью к нодализации, а также физическая корректность полученных результатов.

Модель РУ В-320 сохраняет устойчивость и при совместной работе СПОТ ПГ и СПР КД, что обеспечивает получение корректных результатов и возможность их сравнения с результатами расчетного моделирования аварийных режимов РУ с ВВЭР-1000/В-320 при использовании автономной термосифонной СПОТ Р и системы пассивной тепловой защиты конечного поглотителя от замерзания.

Полученные характеристики переходных процессов позволяют сделать вывод о том, что работа СПОТ ПГ совместно с СПР КД обеспечивает устойчивое расхолаживание РУ при сохранении достаточного запаса подкритичности, тем самым, исключая возможность перегрева и тяжелого повреждения топлива в активной зоне.

Подкритичность активной зоны обеспечивается работой штатных ГЕ САОЗ без увеличения полной (суммарной) эффективности органов регулирования системы управления и защиты реактора, а также без использования дополнительной системы пассивного ввода бора в первый контур.

Список литературы

1. Sviridenko Igor I. Autonomous thermosiphon system for WVER 1000 cooldown / Igor I. Sviridenko, Dmitry V. Shevielov // *Heat Pipe Science and Technology, An International Journal*, 2011. – Vol. 2. – Iss. 1-4. – P. 145–159.
2. Требования европейских энергетических компаний к АЭС с легководными реакторами». Ревизия D, т. 2. Общие требования к ядерному острову. Гл. 1. Требования по безопасности. – EUR, 2012. – 137 с.
3. Sviridenko Igor I. Passive Residual Heat Removal System for WVER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment / Igor I. Sviridenko [et al] // *International Journal of Energy for a Clean Environment*, 2015. – Vol. 16. – Iss. 1–4. – Pp. 209–223.
4. Расчетное обоснование теплогидравлических характеристик реактора и РУ ВВЭР / В.П. Спасков и др. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 340 с.

References

1. Igor I. Sviridenko, Dmitry V. Shevielov Autonomous thermosiphon system for WVER 1000 cooldown. *Heat Pipe Science and Technology, An Int. J.*, 2011, Vol. 2, Issue 1-4, pp. 145-159.
2. *Trebovanij evropejskih jenergeticheskikh kompanij k AJeS s legkovodnymi reaktorami*. Revizija D, t. 2. Obshhie trebovanija k jadernomu ostrovu. Gl. 1. Trebovanija po bezopasnosti. – EUR, 2012. – 137 s.
3. Igor I. Sviridenko [et al]. Passive Residual Heat Removal System for WVER with the Thermosiphon Heatexchange Equipment. *Int. J. of Energy for a Clean Environment*, 2015, Vol. 16. Issue 1–4, pp. 209–223.
4. Spasskov V.P. i dr. *Raschetnoe obosnovanie teplogidravlicheskih harakteristik reaktora i RU VVJeR* [Settlement justification of heathydraulic characteristics of VVER reactors]. Moscow, IKC Akademkniga Publ., 2004. – 340 p. (In Russ.).

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.9:33

Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхностью

В.В. Кувшинов¹, Е.Г. Какушина²

ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²littie@mail.ru

Статья поступила 01.09.2016 г.; после доработки 05.09.2016 г/

Аннотация

Предлагается солнечная термофотовольтаическая установка, состоящая из абсорбера теплового гелиоколлектора, поверх которого расположены кремниевые солнечные элементы. Данная конструкция предназначена для увеличения мощностных характеристик преобразователей солнечной энергии. Вся установка представляет собой комбинированный гелиопрофиль, который монтируется в кровлю зданий и сооружений.

Ключевые слова: термофотовольтаическая установка, кремниевые солнечные элементы, комбинированный гелиопрофиль.

Features enhance power characteristics of solar installations in the development of thermal and electric energy with a receiving surface

V.V. Kuvshinov¹, E.G. Kakyshina²

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²littie@mail.ru

Received 01.09.2016 y.; received in final form 05.09.2016 y.

Abstract

Proposed thermophotovoltaic solar installation consisting of an absorber of thermal solar collector, which is located on top of the silicon solar cells. This design is intended to increase the output characteristics of the solar energy converters. The entire plant is a combined helio-profile, which is mounted in the roof of buildings.

Keywords: thermophotovoltaic installation, silicon solar cells, combined helioprofil.

Введение

С современным развитием науки и техники все больше стало появляться солнечных установок, при работе которых с одной и той же рабочей поверхности одновременно может выраба-

тываться тепловая и электрическая энергия. Такие установки можно с уверенностью отнести к новому классу гелиотехники *термофотовольтаические* солнечные установки. Эти установки одновременно преобразуют всю падающую на них солнечную радиацию в тепло и электроэнер-

гию, т.е. одновременно нагревают теплоноситель и являются электрическим генератором постоянного тока [1].

Использование комбинированных тепло-фотоэлектрических установок дает заметную экономию материалов для их изготовления на единицу мощности, увеличивает их суммарный КПД и эффективность использования. Это объясняется тем, что абсорберы тепловых гелиосистем и фотоэлектрические преобразователи солнечных батарей преобразуют различные длины волн солнечного спектра, поэтому с одной рабочей поверхности можно получать как тепловую, так и электрическую энергию. Производство гелио-фотоэлектрических панелей на основе серийных установок позволит сократить затраты на выпуск абсорберов с дорогими селективными покрытиями и на материалы для производства конструкций фотоэлектрических модулей, объединив их в одну установку [2].

Постановка задачи исследования

Главной проблемой применения солнечных установок является невысокая плотность потока солнечной радиации, преобразовываемой в тепловую и электрическую энергию, их низкий КПД и эффективность использования, как следствие высокая себестоимость за единицу мощности. Невысокий термический потенциал солнечной энергетики определяет более высокие требования к эффективности использования солнечных установок для электрообеспечения и теплоснабжения, к методам определения основных параметров эффективности, как фотоэлектрических модулей, так и гелиоколлекторов. За счет комбинирования плоского теплового абсорбера и фотоэлектрической батареи можно создать конструкцию, позволяющую более эффективно использовать падающую солнечную радиацию и повысить коэффициент преобразования.

Современные промышленные монокремниевые и поликремневые солнечные элементы имеют плоскую конструкцию, их КПД составляет 17-20 %, при коэффициенте поглощения до 95 %. При преобразовании солнечной энергии 80 % энергии идет в основном на тепловой нагрев элементов, что только ухудшает их качественную работу. Расположив солнечные элементы поверх теплового абсорбера гелиоколлектора, при эффективном теплообмене создается возможность для увеличения КПД всей установки. Отвод тепла теплоносителем, циркулирующим по контуру гелиосистемы, препятствует перегреву фотопреобразователей и соответственно

повышает суммарную выработку электрической энергии. Высокий коэффициент поглощения солнечных элементов дает возможность до 80 % поглощенной ими солнечной энергии пойти на нагрев приемной поверхности теплового абсорбера. Коэффициент преобразования до 80 % является высоким показателем для многих абсорберов промышленных тепловых солнечных установок.

Цель и задачи исследования

В статье описаны исследования и рассмотрен принцип работы, комбинированной термо-фотоэлектрической установки, произведен расчет её тепловых и электрических характеристик.

Целью проведенного исследования было теоретическое и экспериментальное подтверждение повышения эффективности использования потока падающей солнечной радиации, термофотоэлектрической установкой и увеличения коэффициента преобразования с единицы площади её приемной поверхности.

Все эксперименты проводились на территории кафедры «Возобновляемые источники энергии» Севастопольского государственного университета, института ядерной энергии и промышленности в сходных условиях, а именно при постоянной солнечной освещенности во время проведения эксперимента, с одними и теми же измерительными приборами [3].

При проведении исследований использовался метод прямых измерений по току и напряжению фотопреобразователя при переменном нагрузочном сопротивлении и методы температурных измерений теплоносителя. Эксперименты проводились в натурных условиях на открытой площадке, при естественном солнечном освещении.

Комбинированная тепло-фотоэлектрическая установка (КСУ) представляет собой полноразмерный промышленный гелиопрофиль, предназначенный непосредственно для монтажа кровельного покрытия жилых домов. Внутри гелиопрофиля находятся трубки для жидкого теплоносителя и полости (каналы) для воздуха или теплоаккумулирующего материала. Такие гелиопрофиля способны покрывать до 7 м кровли по высоте и неограниченную площадь по ширине. На приемной поверхности гелиопрофиля находятся солнечные элементы, спаянные последовательно в цепочку по 36 шт. Фотоэлементы, крепятся к приемной поверхности при помощи специальной теплопроводящей пасты с большим омическим сопротивлением. Элементы покрыв-

вают от 1/3 до 1/2 нижней части гелиопрофиля (рис.1).

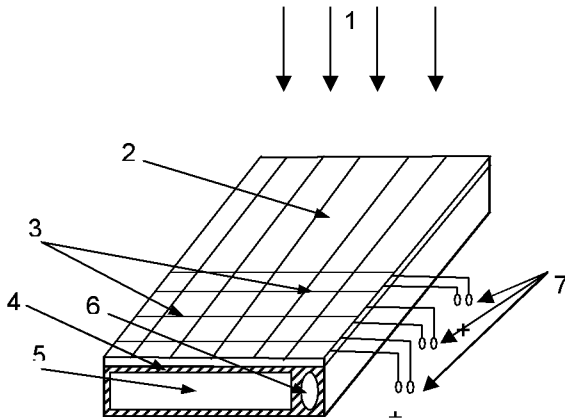


Рис. 1. Комбинированная теплофотоэлектрическая установка

1 – падающая солнечная радиация; 2 – теплопоглощающая поверхность; 3 – солнечные элементы; 4 – стенки поглощающей поверхности гелиопрофиля; 5 – воздушный канал; 6 – канал для воды; 7 – выходные электрические контакты солнечных элементов.

За счет низкой температуры и циркуляции теплоносителя происходит охлаждение элементов, что улучшает качество их работы. Т.к. кремниевые солнечные элементы преобразуют отличную от теплового абсорбера часть спектра, происходит общее увеличение энерговыработки.

Теоретическое описание работы абсорбера термофотоэлектрической установки описывается по формулам (1-4) по следующей методике [4]:

Максимальная мощность $P_{\max}$, вырабатываемая солнечной батареей выражается:

$$P_{\max} = F_{ff} I_{K3} U_{XX} = I_{\max} U_{\max} \quad (1)$$

где F_{ff} – фактор заполнения ВАХ; I_{K3} – ток короткого замыкания; U_{XX} – напряжение холостого хода; $I_{\max}$ – ток в рабочей точке; $U_{\max}$ – напряжение в рабочей точке.

КПД фотоэлектрической солнечной батареи рассчитывается по известной формуле:

$$\eta_{CB} = \frac{I_{\max} U_{\max}}{S_{эл} E_o} = \frac{P_{\max}}{S_{эл} E_o} \quad (2)$$

где: $S_{эл}$ – полезная площадь солнечных элементов (m^2); E_o – освещенность рабочей поверхности ($Вт/м^2$).

Соответственно расчет теплового абсорбера производится также известным методом. Полезная энергия Q_u , отводимая из коллектора в единицу времени (Вт), равна:

$$Q_u = F_R A [I_T (\tau\alpha) - U_L (T_i - T_a)] \quad (3)$$

где: A – площадь коллектора, m^2 ; F_R – коэффициент отвода теплоты из коллектора; I_T – плотность потока суммарной солнечной радиации в плоскости коллектора (с учетом углового коэффициента R), $Вт/м^2$; τ – пропускательная способность прозрачных покрытий по отношению к солнечному излучению; α – поглощательная способность пластины коллектора по отношению к солнечному излучению; U_L – полный коэффициент тепловых потерь коллектора, $Вт/(м^2 \text{ град})$; T_i – температура жидкости на входе в коллектор, $^{\circ}C$ (на номинальном режиме); T_a – температура окружающей среды, $^{\circ}C$.

Упрощенный вариант этой формулы более применим для практических расчетов:

$$Q_u = S_{CK} G C_p (T_{вых} - T_i) (Bm), \quad (4)$$

где S_{CK} – площадь коллектора, m^2 . Соответственно КПД солнечного коллектора определяется формулой:

$$\eta_{CK} = \frac{Q_u}{S_{CK} E_o} \quad (5)$$

Для комбинированной установки освещенность E_o одинакова для тепловой и электрической части, а величины площадей S_{CK} и $S_{эл}$, эквивалентны, т.е. можно записать:

$$\eta_{CK} = \frac{P_{CK}}{S_{KCK} E_o}, \eta_{CB} = \frac{P_{CB}}{S_{KCK} E_o} \quad (6)$$

где η_{CK} – тепловой, а η_{CB} – электрический КПД комбинированной установки, P_{CK} и P_{CB} , мощность отводимая от теплового коллектора и солнечной батареи, S_{KCK} – полезная площадь комбинированной солнечной установки, заполненная солнечными элементами.

Общая мощность комбинированной установки равна сумме мощностей тепловой и фотоэлектрической частей установки:

$$P_{KCK} = P_{CK} + P_{CB} = S_{KCK} E_o (\eta_{CK} + \eta_{CB}) = S_{KCK} E_o \eta_{KCK} \quad (7)$$

где η_{KCK} – общий суммарный КПД комбинированной установки (комбинированного солнечного коллектора).

Отсюда видно, что при увеличении отбираемой мощности от солнечной установки за счет фотоэлектрической составляющей возрастает её суммарный КПД, т.к. площадь и освещенность рабочей поверхности остаются постоянными.

При неполном покрытии приемной поверхности комбинированной установки солнечными элементами формулу (7) необходимо заменить следующей формулой:

$$P_{KCK} = S_{KCK} E_o (\eta_{CK} + f_{КСУ} \eta_{CB}) \quad (8)$$

где $f_{КСУ}$ - коэффициент заполнения солнечными элементами приемной поверхности комбинированной установки. В нашем случае он изменяется в пределах от 1/2 до 1/3.

КПД солнечных элементов при нагреве уменьшается по формуле (9):

$$\eta_{CB} = f_{КСУ} \eta_o (1 - k(T_i - T_o)) \quad (9)$$

где η_o - КПД фотоэлемента при $T_o = 25^\circ\text{C}$, T_i - температура нагретого фотоэлемента (считаем её равной температуре жидкости на входе в коллектор), падение КПД солнечного элемента, зависит от температурного градиента k , и составляет от 0,3 до 0,5 %/ $^\circ\text{C}$ [5].

С учетом этого формула принимает вид (10):

$$P_{KCK} = S_{KCK} E_o \frac{GC_p (T_{вых} - T_i)}{E_o} + S_{KCK} E_o f_{КСУ} \eta_o (1 - k(T_i - T_o)) \quad (10)$$

По формулам (1-10) можно определить все параметры и характеристики КСУ с учетом тепловой и электрической части.

Результаты исследований

Для проведения экспериментов использовались две солнечные установки равных размеров, с одинаковыми тепловыми абсорберами, расположенными под одинаковыми углами к Солнцу (рис.2). На абсорбере одной установки находились солнечные элементы, длина установок составляла 3 м, а ширина 1 м. Фотоэлектрическая часть установки состояла из трёх фотоэлектрических модулей с одинаковой мощностью. Т.к. площади установок были равны, то обе установки получали одинаковый приход солнечной радиации и находились в одинаковых условиях.



Рис. 2. Тепловая (слева) и теплофотоэлектрическая (справа) солнечные установки

При проведении экспериментов была получена сравнительная тепловая выработка двух солнечных установок (рис.3).

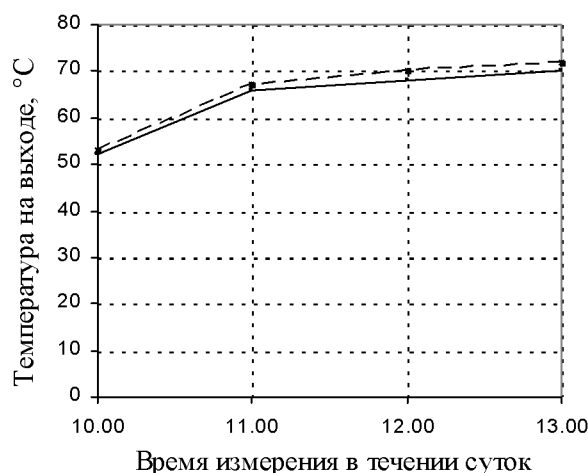


Рис. 3. Температура теплоносителя на выходе солнечных установок
- - - тепловой гелиофиль, — комбинированный гелиофиль,

Как видно из данных при одновременной выработке тепловой и электрической энергии, температуры теплоносителя на выходе различались всего на 1-2 градуса, т.е. по выработке тепла установки почти не отличаются. При этом комбинированная термофотоэлектрическая установка вырабатывала электроэнергию.

На рис. 4 приведены графики удельных тепловых мощностных характеристик ($\text{Вт}/\text{м}^2$) двух солнечных установок.

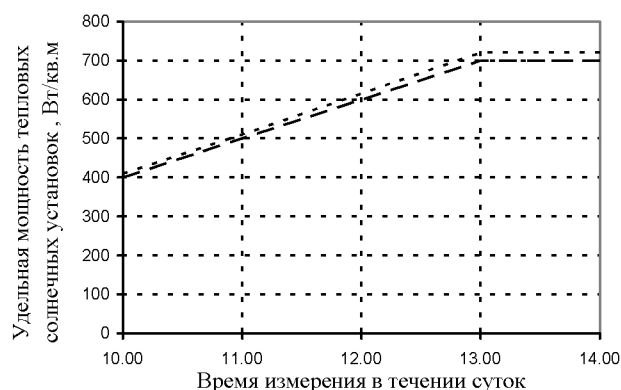


Рис. 4. Сравнительная мощностная тепловая выработка установок
..... тепловой гелиофиль, - - - комбинированный гелиофиль,

При наличии на гелиофилье работающих фотоэлементов каждая из трех фотоэлектрических батарей вырабатывала до 48 Вт мощности.

При этом заполнение фотоэлементами гелио-профиля составляло 1/3. Суммарная мощность всех фотоэлектрических модулей составляет 144 Вт. В таблице 1 приведены выходные электрические характеристики термофотоэлектрической установки.

Таблица 1. Данные нагрузочных характеристик отдельной фотоэлектрической батареи гелио-профиля

Характеристики отдельной фотоэлектрической батареи гелиопрофиля										
I (А) – экспериментальное значение	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,25	3,2	3,2	3
U (В) – экспериментальное значение	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18
P (Вт) – экспериментальное значение	0	7	14	21	26,4	32,5	38,4	44,8	48	39,6
Характеристики модуля получены при освещенности 960 Вт/м ² , T _{воздуха} =30 °С										

В результате проведенных исследований становится ясно, что использование нагретого Солнцем теплоносителя и использование электрических элементов существенно увеличивает общий коэффициент преобразования гелиоустановки. В среднем каждая из 3-х батарей комбинированного гелиопрофиля вырабатывает около 50 Вт электрической мощности (табл.1), тепловая же мощность обоих профилей оставалась приблизительно постоянной (рис 4). Это происходит из-за того, что фотоэлектрические элементы преобразовывают солнечную радиацию длин волн, отличную от спектра необходимого тепловому коллектору для нагрева воды [6]. При работе солнечных батарей без теплового отвода инфракрасная тепловая составляющая солнечной радиации идет на нагрев фотоэлементов, что часто может приводить к их перегреву и падению КПД фотоэлементов [7].

Выводы

1. Подтверждены, полученные теоретические расчеты по увеличению коэффициента преобразования при сравнении экспериментальных

данных, полученных при сравнении работы тепловой и комбинированной установок.

2. Результаты исследований показали, что с 1 м² поверхности разработанного комбинированного гелиопрофиля можно получать до 700 Вт тепловой и около 150 Вт электрической мощности.

3. Суммарный коэффициент преобразования солнечной энергии установки увеличивается до 85 %. При этом, что тепловой КПД гелиопрофиля может составлять до 70 %, а электрический КПД солнечных элементов, используемых в исследованиях, составляет более 15%.

4. По результатам экспериментов можно сделать заключение об эффективности работы солнечных установок с комбинированной выработкой тепловой и электрической энергии на предложенные установки получены патенты [2,8].

Список литературы

1. Кузнецов К. В. Исследование характеристик солнечного воздушного гибридного коллектора / К. В. Кузнецов, И. И. Тюхов, Э. Д. Сергиевский // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве, Труды 6-й Международной научно-технической конференции, 13-14 мая 2008 г. – Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2008. – Ч. 4. – С. 227 - 231.
2. Кувшинов В.В. Пат. 150121 Российская федерация; МПК H 01 L 31/00. Фототермопреобразователь солнечной энергии / Кувшинов В. В., Башта А.И., Сафонов В. А.; патентообладатель Кувшинов В. В. – Заявка № 2014149414/93; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.
3. 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).
4. Кувшинов В.В. Методы расчета и повышения эффективности использования теплофотоэлектрических установок / В.В. Кувшинов // Сборник научных трудов СНУЯЭ и П – 2013. – Вып. 3 (47) – С.166 - 172.
5. Арбузов Ю. Д. Основы фотоэлектричества / Ю. Д. Арбузов, В. М. Евдокимов – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. – 292 с.
6. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун // – М.: Наука,

1985. – 300 с.

7. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.
8. Кувшинов В.В. Пат. 150122 Российская федерация; МПК H 01 L 31/00. Фототермопреобразователь солнечной энергии / Башта А.И., Кувшинов В. В.; патентообладатели Башта А.И., Кувшинов В. В. – Заявка № 2014149416/93; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.

References

1. Kyznetsov K.V. Investigation of the characteristics of the hybrid solar air collector. *Materialy 6-oi Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials of 6-th International scientific-technical conference], Moscow, GNU VIES, Publ., 2008. pp. 227 - 231.
2. Kuvshinov V.V. Photo-thermal converter of solar energy. *Pat.150121 Russian Federation; MPK H01L31/00*. Application № 2014149414/93; appl. 17.10.2014; published on 27.01.2015, Bull. No. 3.
3. Photovoltaic from crystal-crystal-silicon devices. Methods of correcting the measurement results of current-voltage ha-tics (IEC 891-87) GOST 28976-91. Standards Publishing House, 2004, 42 p.
4. Kuvshinov V.V. Methods of calculation and improve the utilization of the heat of photovoltaic installations. *Sbornik nauchnykh trudov SNUNE&I*. Sevastopol, SNUNE&I, 2013. No. 3 (47). pp. 166 – 172.
5. Arbuzov U.D. Basics of photovoltaics. Moscow, GNU VIES, Publ., 2007, 292 p.
6. Koltun M.M. *Optika i metrologia solnechnih elementov* [Optics and Metrology of solar cells]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 300 p.
7. Rauschenbach G. *Spravochnik po proektirovaniu colnechnix batarei* [Guide for the design of solar panels], Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983, 397 p.
8. Kuvshinov V.V. Photos solar thermal converte. *Pat.150122 Russian Federation; MPK H01L31/00*. Application № 2014149416/93; appl. 17.10.2014; published on 27.01.2015, Bull. No. 3.

Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя

В.В. Кувшинов¹, Е.Г. Какушина², А.Д. Васильев³, А.А. Горецкий⁴.

ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²littie@mail.ru, ³vasilev@mail.ru,
⁴goretski@mail.ru

Статья поступила 19.09.2016 г.; после доработки 21.09.2016 г.

Аннотация

Предлагается использование термофотоэлектрических гелиопрофилей в качестве энергогенерирующих установок в коммунальном хозяйстве города Севастополя. Установки совмещают в себе гелио-кровлю здания, тепловой солнечный коллектор и фотоэлектрический генератор.

Ключевые слова: термофотоэлектрическая установка, гелиопрофиль, термофотоэлектрический гелиопрофиль, фотоэлектрический элемент, солнечный коллектор.

Using thermo-photovoltaic plants for heat and electricity to Sevastopol

V.V. Kuvshinov¹, E.G. Kakyshina², A.D. Vasilev³, A.A. Goretski⁴

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
¹kuvshinov.vladimir@gmail.com, ²littie@mail.ru, ³vasilev@mail.ru, ⁴goretski@mail.ru

Received 19.09.2016 y.; received in final form 21.09.2016 y.

Abstract

It is proposed to use thermophotovoltaic gelioprofiley as power generating plants in the utilities sector of the city of Sevastopol. Installations combine helio-roof buildings, thermal solar collectors and photovoltaic generator.

Keywords: thermophotovoltaic installation, gelioprofil, thermophotovoltaic gelioprofil, photovoltaic cell.

Введение

В странах, начинающих развивать свою энергетику, солнечные установки для получения тепловой и электрической энергии могут стать основными энергогенерирующими мощностями, при этом может быть пропущена стадия использования ископаемого топлива. При преобладающем использовании для нагрева воды электричества, солнечный нагрев может снизить уровень пиковых нагрузок, это преимущество можно использовать для уменьшения цены на солнечные нагреватели, к этому можно прибавить уменьшение вредных выбросов и положительное влияние на чистоту воздуха [1]. Факторы, способные положительно влиять на рынок солнечной

энергетики, – это политика правительства в области энергосбережения, активность промышленности, высокие технологии в производстве солнечных установок, наличие монтажных организаций [2].

Постановка задачи исследования

Известно, что солнечная радиация, падающая на поверхность Земли, является нестабильным энергетическим источником, как в течение года, так и в течение суток, и во многом зависит от климатических условий данной местности. По оценкам учёных до 75 процентов поступающей солнечной инсоляции приходится на тёплое время года (с апреля по сентябрь) и только 25

процентов - на зимний период, когда потребность в тепловой энергии является наибольшей [3]. Поэтому необходимо применение специальных технических устройств по аккумулярованию энергии на период отсутствия солнечной радиации. Анализируя данные поступающей солнечной радиации на поверхность абсорбера и возможности её преобразования в тепловую энергию в течение календарного года на территории крымского региона, можно предложить следующие основные технические решения по созданию солнечных установок и систем солнечного теплоснабжения с учётом достижения наиболее высокого энергетического результата [3]. Первое – использование конструкций, строящихся в Крыму жилых и общественных зданий для использования солнечной энергии. Второе – широкое применение сезонных солнечных установок с суточным аккумулярованием для получения горячей воды на нужды горячего водоснабжения объектов различного назначения в летний период. Третье – строительство комбинированных солнечных установок для электрообеспечения и теплоснабжения зданий [3].

При горизонтальном (на плоской кровле) или вертикальном (на стенах) расположении эффективность гелиоколлекторов снижается примерно на 20-25 %, однако, при этом существенно упрощается монтаж, и уменьшаются ветровые нагрузки. По экспериментальным и расчетным данным применение гелиосистем может обеспечить снижение расхода традиционных энергоносителей (газ, дизельное топливо, мазут, уголь) от 100 % при летнем режиме работы объекта (пансионаты, детские лагеря) до 50-70 % при круглогодичной работе [3]. Срок окупаемости гелиосистем при существующих ценах на гелиоколлекторы может составить от трех до семи лет, в зависимости от сложности систем и вида замещаемого традиционного топлива [3].

Проблема горячего водоснабжения, особенно в летний период, является одной из энергозатратных задач ЖКХ городов, объектов санаторно-курортного комплекса, больниц, детских учреждений и т.п. В Крыму, в том числе Севастополе, эта задача усугубляется отсутствием собственных энергоносителей [4].

Накопленный к настоящему времени опыт использования нетрадиционных энергоносителей показывает, что для обеспечения населения и предприятий горячей водой с температурой вплоть до 100 °С могут использоваться солнечные котельные на основе гелиоколлекторов различных конструкций.

По данным статистики в Севастополе за год сжигается около 250 млн. м³ газа, без учета черноморского флота. По научным данным, при сжигании 1000 кг угля с зольностью 30 - 40% в воздух вылетает не менее 200 кг чёрной сажи и не менее 1500 кг парникового газа CO₂ вместе с ядовитым газом CO. Для нагрева 1 м³ воды от 20°C до 60°C необходимо сжечь в котле с КПД 50 % около 20 кг угля или 10 м³ газа, или накрутить 50 кВт*ч электроэнергии. Это же количество горячей воды летом (с мая по октябрь) в Крыму можно получить с помощью гелиоколлекторов площадью 8-10 м² [4].

Об экологической пользе от использования для отопления и горячего водоснабжения солнечных водонагревательных установок в Крыму можно судить по результатам работы экспертов Европейского союза, работавших в Крыму по программе TESIS [4] и получивших данные о количестве вредных выбросов в атмосферу Крыма (табл.1).

Таблица 1. Выбросы в атмосферу Крымского региона

Наименования загрязняющих веществ	Показатели по видам топлива (т/год)		
	Уголь	Нефть	Природный газ
Углекислый газ (CO ₂)	30 603	24 054	16 206
Двуокись серы (SO ₂)	536	508	-
Окислы азота (NO ₂)	56	100	19
Твердые частицы	920	32	1

Результаты исследования

Для проведения технико-экономического анализа эффективности использования солнечных установок на территории Крыма, была использована модель расчета гелиотехнических мощностей городов полуострова (Симферополь, Севастополь и др.) [4]. В предложенной статье рассматривается возможность установки термо-фотоэлектрических гелиопрофилей [5] на крышах города и расчет их энергетического потенциала.

Комбинированная термо-фотоэлектрическая установка представляет собой полноразмерный промышленный гелиопрофиль, предназначенный непосредственно для монтажа кровельного

покрытия жилых домов [5]. Внутри гелиопрофиля находятся трубки для жидкого теплоносителя (рис.1). Фотоэлементы крепятся к приемной поверхности при помощи специальной теплопроводящей пасты с большим омическим сопротивлением и могут покрывать до 100 % поверхности гелиопрофиля.

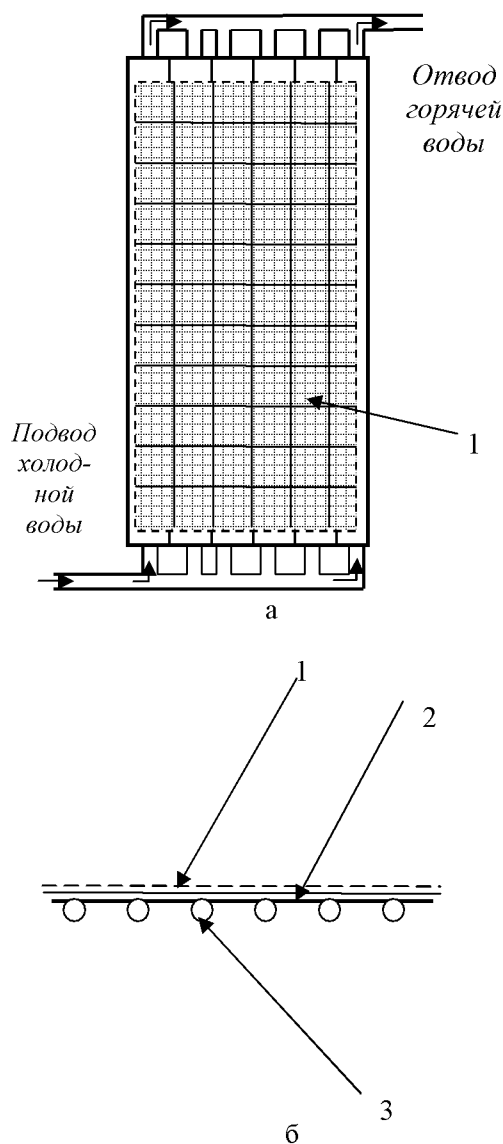


Рис. 1. Комбинированная термо-фотоэлектрическая установка с полным покрытием абсорбера солнечными элементами (а – комбинированный коллектор, б – абсорбер комбинированной установки): 1 – фотоэлементы; 2 – приемная металлическая пластина абсорбера; 3 – трубки для теплоносителя.

В результате проведенных исследований для г. Севастополя был рассчитан предварительный технический потенциал, а также определенные мощностные характеристики гелиосистем.

При расчетах технического потенциала гелиосистем учитывались закономерные изменения поступающего солнечного излучения (определяются вращением Земли вокруг Солнца) и стохастические изменения (определяются изменением облачности и прозрачности атмосферы).

Были учтены два основных способа возможного затенения приемной поверхности: горизонтальными и вертикальными препятствиями [4].

На рис. 2 приведены результаты анализа технически возможного потенциала солнечной энергии для всех крыш зданий г. Севастополя, работающих круглогодично при оптимальном угле наклона приемных поверхностей.

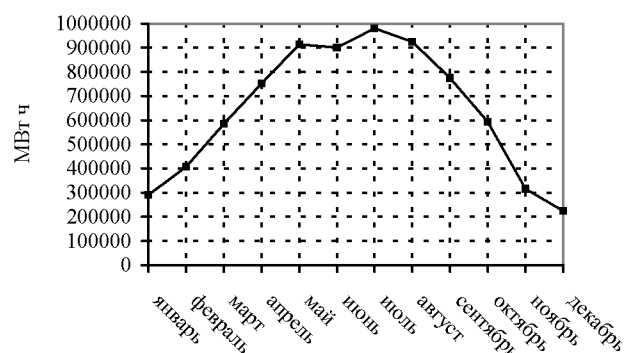


Рис. 2. Технически возможный потенциал солнечной энергии

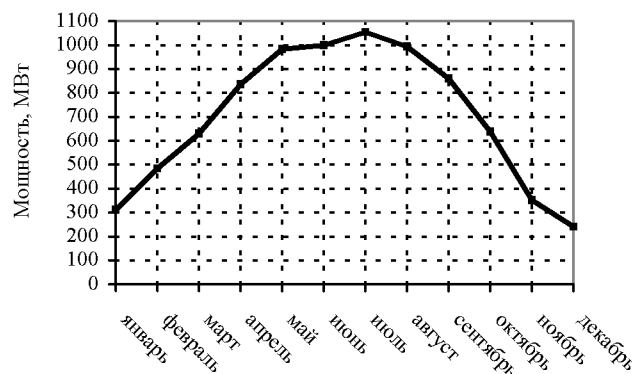


Рис. 3. Технически возможные мощностные характеристики для термо-фотоэлектрических установок

Используя данные графиков на рис. 2, мы можем рассчитать мощностной технический потенциал для термо-фотоэлектрических установок (рис.3), расположенных, при оптимальном угле наклона приемных поверхностей, на крышах города Севастополя.

Возможная экономия органического топлива и предотвращение различных выбросов путём

использования тепло-фотоэлектрических установок в течение года представлены в таблице 2.

Таблица 2. Объемы сокращения выбросов органического топлива

Наименование вещества	Объемы сокращения выбросов в т/год			Общая экономия органического топлива в ТДж/год
	Виды органического топлива			
	Уголь	Нефть	Природный газ	
CO ₂	317591,7	249627,3	168185,9	2604
SO ₂	5567,4	5273,1	-	
NO _x	585,9	1041,6	195,3	
Твердые частицы	9546,3	333,3	10,4	

Учитывая, что промышленность выпускает, в основном, тепловые коллекторы на одних предприятиях, а на других выпускаются фотоэлектрические батареи, нами предлагается в целях экономии площади покрытия кровли, что сдерживается размерами крыш, использовать солнечные комбинированные установки [5]. Наиболее повторяющиеся площади кровель для индивидуальных частных строений составляют около 100 м² [3]. Максимальная тепловая мощность исследуемой установки составляет около 0,7 кВт с 1 м², а электрическая до 0,15 кВт с 1 м². При условии средней площади кровли для одного частного жилого дома 100 м², максимальная удельная тепловая мощность комбинированной установки составит 70 кВт, а электрическая 15 кВт. С учетом выше описанного можно рассчитать экономию средств, получаемую при использовании комбинированного гелиопрофиля.

Номинальная электрическая мощность $P_{эл.ном.}$, вырабатываемая фотоэлектрической батареей рассчитывается по формуле:

$$P_{эл.ном.} = I_o S_{ТФУ} \eta_{эл.} = 1000 \cdot 100 \cdot 0,15 = 15 (кВт) \quad (1)$$

где I_o – максимальная интенсивность солнечной радиации (составляет 1000 Вт/м²);

$S_{ТФУ}$ – полезная площадь термо-фотоэлектрической установки (составляет 100 м²);

$\eta_{эл.}$ – электрический к.п.д. установки (с учетом к.п.д. фотоэлементов 15 %, составляет 0,15).

Так как освещенность рабочей поверхности солнечной батареи (а также комбинированного гелиопрофиля), и соответственно, вырабатываемая

мощность зависит от светлого времени суток, облачности, и других факторов, необходимо в формулу (1) добавить коэффициент использования номинальной мощности $K_{ном.}$. Значение коэффициента $K_{ном.}$ составляет в среднем за год около 0,1. Отсюда среднегодовая выработка электроэнергии $E_{год.}$ составит:

$$E_{год.} = P_{max} K_{ном.} T_{год.} = 15 \cdot 0,1 \cdot 8760 = 13140 (кВт \cdot ч) \quad (2)$$

где $T_{год.}$ – количество часов в году.

Соответственно месячная выработка составит:

$$E_{мес.} = P_{max} K_{ном.} T_{мес.} = 15 \cdot 0,1 \cdot 720 = 1080 (кВт \cdot ч) \quad (3)$$

где $T_{мес.}$ – количество часов в месяц (для 30 дней).

Расчет теплового абсорбера производится методом, описанным в работе [6]. Полезная мощность Q_u , отводимая из коллектора в единицу времени (Вт), равна:

$$Q_u = GC_p (t_{вых} - t_{вх.}) (Вт), \quad (4)$$

где G – расход теплоносителя (кг/с);

C_p – теплоемкость воды (4200 Дж/кг·К);

$t_{вых.}$ – температура теплоносителя на выходе из коллектора;

$t_{вх.}$ – температура теплоносителя на входе в коллектор.

В нашем случае максимальная полезная мощность установки (Q_u) составляет 70 кВт (из расчета 0,7 кВт с 1 м², при площади установки 100 м²). Температура воды на выходе из коллектора для горячего водоснабжения составляет 50 °С. Принимаем температуру воды на входе в систему 20 °С.

Количество горячей воды (л), за время T , составляет:

$$m = \frac{Q_u T}{C_p (t_{вых} - t_{вх.})} \quad (5)$$

При работе на номинальном режиме за сутки около 12 часов количество горячей воды (л), получаемой с 1 м² установки за время T (сек), составит:

$$m = \frac{Q_u T}{C_p S_{ТФУ} (t_{вых} - t_{вх.})} = \frac{70000 \cdot 12 \cdot 3600}{4200 \cdot 100 \cdot (50 - 20)} = 240 (л / м^2) \quad (6)$$

Месячная тепловая выработка гелиоколлектора с учетом годового коэффициента использования номинальной мощности составит:

$$E_{\text{мес.}} = Q_{\text{н}} K_{\text{ном.}} T_{\text{мес.}} = 70 \cdot 0,1 \cdot 720 = 5040 (\text{кВт} \cdot \text{ч}) \quad (7)$$

Годовая выработка:

$$E_{\text{год.}} = Q_{\text{н}} K_{\text{ном.}} T_{\text{год.}} = 70 \cdot 0,1 \cdot 8760 = 61320 (\text{кВт} \cdot \text{ч}) \quad (8)$$

Стоимость промышленных фотоэлектрических модулей разных мировых производителей, по их данным, составляет около 70 руб. за 1 Вт установленной мощности, мировая цена за солнечные элементы, из которых собран модуль, различных фирм производителей, составляет 35 руб. за 1 Вт установленной мощности.

Стоимость промышленного гелиопрофиля, составляет 14000 руб. Цена комбинированной установки складывается из цены промышленного гелиопрофиля и цены фотоэлементов. Электрическая мощность 1 м² солнечной комбинированной установки составляет 150 Вт, за такую же мощность фотоэлектрических модулей цена составляет 10500 руб. Так как стоимость фотоэлементов (за 150 Вт) составляет 5250 руб., то экономия средств составляет 5250 руб. (без учета стоимости работ).

При монтаже комбинированной установки одновременно собирается гелиопрофиль и фотоэлектрические блоки, соответственно, стоимость работ, сравнима со стоимостью монтажа гелиопрофиля без элементов, а экономия средств составляет около 5250 руб. с 1 м² установки. Полная экономия средств $C_{\text{пол}}$ со всей кровли за счет материалов конструкций фотоэлектрических модулей и монтажа составляет:

$$C_{\text{пол}} = 5250 \cdot 100 \text{ м}^2 = 525000 (\text{руб.}) \quad (9)$$

При использовании комбинированного гелиопрофиля, в отличие от установки теплового коллектора и фотоэлектрических батарей при той же мощности, получается значительный экономический эффект. Мощностные и экономические характеристики установок приведены в таблице 3.

Экономический расчет теплофотоэлектрической установки производится отдельно для тепловой и электрической части. Тепловой расчет установки включает в себя расчет системы горячего водоснабжения и отопления, а электрический – данные по работе солнечных элементов.

Выработка электроэнергии за месяц солнечной фотоэлектрической установкой, согласно формуле (3), составляет 1080 кВт·ч, цена для

потребителей в России составляет 1,44 руб., а при учете «зеленого тарифа» (используется для расчетов на фотоэлектрических станциях, расположенных в Республике Крым около Симферополя) 7 руб. за 1 кВт·ч потребляемой электроэнергии.

Таблица 3. Экономические характеристики термофотоэлектрической установки в сравнении с гелиопрофилем и фотоэлектрическим модулем при равных мощностях

Солнечные установки	Характеристики установок				
	Цена за 1 м ² гелиопрофиля (руб.)	Удельная тепловая мощность (Вт/м ²)	Удельная электрическая мощность (Вт/м ²)	Удельная суммарная мощность (Вт/м ²)	Цена за 1 Вт суммарной мощности (\$)
Промышленный гелиопрофиль	14000	700	-	700	20
Теплофотоэлектрический гелиопрофиль	19250	700	150	850	22,6
Промышленные гелиопрофиль и фотоэлектрические модули	24500	700	150	850	28,8

Следовательно, стоимость электроэнергии составляет со всей крыши автономного строения:

$$1080 \text{ кВт} \cdot 1,44 \text{ руб.} = 1555,2 \text{ руб. в месяц}$$

С учетом «зеленого тарифа»:

$$1080 \text{ кВт} \cdot 7 \text{ руб.} = 7560 \text{ руб. в месяц},$$

соответственно, за год: 18927,6 руб. и 91980 руб.

Стоимость горячей воды рассчитывается по количеству потребителей, проживающих в строении, в среднем этот показатель для частного жилого дома (площадью 100 м²) составляет 5 человек. По санитарным нормам количество горячей воды, необходимой для 1 человека, составляет 100 л в день, а её температура не менее 50 °С. Учитывая, среднюю температуру подачи воды для нагрева

равную 20 °С, согласно формулам (4) и (5) для нагрева воды для N человек за сутки, необходимо израсходовать тепловой энергии:

$$Q_u = NmC_p(t_{\text{вых}} - t_{\text{вх}}) =$$

$$= 5 \cdot 100 \cdot 4200 \cdot (50 - 20) =$$

$$= 63000(\text{кДж}) = 17,5 \cdot \text{кВт} \cdot \text{ч} \quad (10)$$

В день расход горячей воды на 5 человек составляет 0,5 м³. Соответственно, за месяц тепловой расход при нагреве составит:

$$17,5(\text{кВт} \cdot \text{ч}) \cdot 30(\text{дней}) = 525(\text{кВт} \cdot \text{ч})$$

Цена за 1 м³ горячей воды для централизованного водоснабжения составляет 275 руб. Следовательно, стоимость горячей воды составляет:

$$0,5\text{м}^3 \cdot 275(\text{руб.}) \cdot 30(\text{дней}) = 4125(\text{руб.})$$

За год экономия составит:

$$0,5\text{м}^3 \cdot 275(\text{руб.}) \cdot 365(\text{дней}) = 50187,5(\text{руб.})$$

Средняя стоимость тепловой энергии по Республике Крым при централизованном теплоснабжении составляет за 1 кВт·ч 1,7 руб. [7] для частных потребителей и 3 руб. – для предприятий. Соответственно, за месяц можно подсчитать экономию тепловой энергии за счет использования солнечной установки, за вычетом энергии идущей на нагрев горячей воды, согласно формуле (7):

$$5040(\text{кВт} \cdot \text{ч}) - 525(\text{кВт} \cdot \text{ч}) = 4515(\text{кВт} \cdot \text{ч})$$

$$4515(\text{кВт} \cdot \text{ч}) \cdot 1,7(\text{руб.}) = 7675,5(\text{руб.}) \text{ за месяц}$$

– для частных потребителей;

$$4515(\text{кВт} \cdot \text{ч}) \cdot 3(\text{руб.}) = 13545(\text{руб.}) \text{ за месяц}$$

– для предприятий.

За год экономия средств, согласно формуле (8) составит:

$$61320(\text{кВт} \cdot \text{ч}) - (525(\text{кВт} \cdot \text{ч}) \cdot 12(\text{месяцев})) \cdot$$

$$\cdot 1,7(\text{руб.}) = 93534(\text{руб.})$$

– для частных потребителей;

$$61320(\text{кВт} \cdot \text{ч}) - (525(\text{кВт} \cdot \text{ч}) \cdot 12(\text{месяцев})) \cdot$$

$$\cdot 3(\text{руб.}) = 165060(\text{руб.})$$

– для предприятий.

Общая экономия средств за счет солнечного электрообеспечения и отопления составляет за месяц:

13355,7 руб. для частных потребителей, при отсутствии «зеленого тарифа»;

19360,6 руб. для частных потребителей с учетом «зеленого тарифа»;

19225,2 руб. для предприятий, при отсутствии «зеленого тарифа»;

25230 руб. для предприятий с учетом «зеленого тарифа».

Соответственно, годовая экономия средств для строения с покрытием комбинированного

гелиопрофиля общей площадью 100 м² составит от 13355 руб. до 25230 руб.

Выводы

Использование встроенных в крышу строений, комбинированных гелиопрофилей позволяет значительно экономить материалы, площади и себестоимость работ по монтажу и установке систем солнечных теплоэлектрических установок. Средняя технически возможная мощность термо-фотоэлектрических установок для Севастополя составляет в летний период около 1000 МВт. Средний годовой энергетический потенциал составляет около 700 тыс. МВт·ч.

Использование предложенных солнечных установок для обеспечения автономного потребителя позволяет при комбинированной выработке тепловой и электрической энергии значительно повысить общую эффективность всей системы, годовая экономия средств, при использовании предложенных установок на крыше площадью 100 м², составляет от 13355 руб. до 25230 руб.

Список литературы

1. Устойчивое развитие – стратегия развития Крыма в 21 веке / [Боков В. А., Ена В. Г., Ефимов С. А., и др.]. – Симферополь, 2000. – 80 с.
2. Возобновляемая энергетика 2003: состояние, проблемы, перспективы: Сб. докладов международной научно-практической конференции (4-6 ноября 2003 г., Санкт-Петербург). – Санкт-Петербург: Изд-во Санкт-Петербургского политехнического ун-та, 2003. – 616 с.
3. Кивовский С. А. Энергосбережение в Крыму: приложение к научно-практическому дискуссионно-аналитическому сборнику «Вопросы развития Крыма». / Кивовский С. А., Ефимов С. А., Петрук С. К., Сафонов В. А. – Симферополь: Таврия-Плюс, 2001. – 220 с.
4. Солнечная энергетика для устойчивого развития Крыма / [Н. В. Багров, А. И. Боков, Э. А. Бекиров, В. В. Кувшинов и др.]. – Симферополь: Крымский научный центр, 2009. – 293 с.
5. Кувшинов В.В. Пат. 150121 Российская федерация; МПК Н 01 L 31/00. Фототермопреобразование солнечной энергии / Кувшинов В. В., Башта А.И., Сафонов В. А.; патентообладатель Кувшинов В. В. – Заявка № 2014149414/93; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.
6. Бекман У. Расчет систем солнечного теплоснабжения / У. Бекман, С. Кейли, Д. Даффи. – Москва: Энергоатомиздат, 1988. – 176 с.
7. Государственный комитет по ценам и тарифам Республики Крым. Тарифы для населения, Симферополь, 2016. [Электронный ресурс]. – Режим

доступа: <http://gkz.rk.gov.ru>.

8. Кувшинов В.В. Пат. 150122 Российская федерация; МПК H 01 L 31/00. Фототермопреобразователь солнечной энергии / Башта А.И., Кувшинов В. В.; патентообладатели Башта А.И., Кувшинов В. В. – Заявка № 2014149416/93; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.
9. Кузнецов К. В. Исследование характеристик солнечного воздушного гибридного коллектора / К. В. Кузнецов, И. И. Тюхов, Э. Д. Сергиевский // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве, Труды 6-й Международной научно-технической конференции, 13-14 мая 2008 г. – Москва, ГНУ ВИЭСХ, 2008. – Ч. 4. – С. 227 – 231

References

1. Bokod V.A. Sustainable development - a strategy for development of the Crimea in the 21st century. Simferopol, 2000, 80 p.
2. Renewable Energy 2003, consisting of, problems and prospects. *Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Proceedings of the international scientific-practical conference], St. Petersburg, PPU, Publ., 2003, 616p.
3. Kibovskii C.A. Energy saving in the Crimea: application to scientific and practical brainstorming col-

- lection "Problems of development of the Crimea". Simferopol, Tavria-Plus, 2001, 220 p.
4. Bagrov N.V. Solar energy for sustainable development of Crimea. Simferopol, Crimean Scientific Center, 2009, 293 p.
5. Kuvshinov V.V. Photo-thermal converter of solar energy. *Pat.150121 Russian Federation; MPK H01L31/00/. Application № 2014149414/93; appl. 17.10.2014; published on 27.01.2015, Bull. No. 3*
6. Bekman Y. Calculation of solar heating systems. Moscow, Energoatomisdat, 1988, pp 176.
7. The State Committee on Prices and ta-reef Republic of Crimea. Tariffs for the population, Simferopol, 2016. [electronic resource]. - Access: <http://gkz.rk.gov.ru>.
8. Kuvshinov V.V. Photos solar thermal converte. *Pat.150122 Russian Federation; MPK H01L31/00/. Application № 2014149416/93; appl. 17.10.2014; published on 27.01.2015, Bull. No. 3*.
9. Kyznetsov K.V. Investigation of the characteristics of the hybrid solar air collector. *Materialy 6-oi Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials of 6-th International scientific-technical conference], Moscow, GNU VIES, Publ., 2008, pp. 227 - 231.

УДК 378.09:621.365

Проблемы подготовки кадров для электроэнергетики Крыма

Н.М. Шайтор¹, А.В. Горпинченко²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, Shaytor1950@mail.ru, algornew@mail.ru

Статья поступила 29.08.2016 г.; после доработки 01.09.2016 г.

Аннотация

Рассматриваются актуальные вопросы подготовки бакалавров и магистров для электроэнергетики региона с учётом основных тенденций её развития в будущем. Обоснован вывод о необходимости присоединения учебного заведения к Технологической платформе «Интеллектуальная электроэнергетическая система России» и открытия магистратуры по профилю «Интеллектуальные электроэнергетические системы и сети».

Ключевые слова: электроэнергетика, Крым, подготовка кадров, Технологическая платформа, интеллектуальная электроэнергетическая система, программа развития.

Training problems for power industry of the Crimea

N.M. Shaytor¹, A.V. Gorpinchenko²

Sevastopol, State University, 33 Vniversitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.

¹shaytor1950@mail.ru, ²algornew@mail.ru

Received 29.08.2016 y.; received in final form 01.09.2016 y.

Abstract

Topical issues of training of bachelors and masters for region power industry taking into account the main tendencies of its development in the future are considered. A valid conclusion about need of accession of educational institution to the Technological platform "Intellectual Electrical Power System of Russia" and opening of a magistracy on the "Intellectual Electrical Power Systems and Networks" profile.

Keywords: power industry, Crimea, training, Technological platform, intellectual electrical power system, program of development.

Введение

Проблемы подготовки кадров для электроэнергетики необходимо рассматривать и решать с учётом основных тенденций её развития в будущем. К неоспоримому условию развития человеческой цивилизации следует отнести неуклонное возрастание энергопотребления. При этом электрическая энергия продолжает оставаться самым удобным и распространённым видом энергии, предназначенным для её производства, передачи и потребления. Однако применение традиционных способов получения энергии приводит к ухудшению экологии и истощению природных энергетических ресурсов,

поэтому исключительно перспективным направлением электроэнергетики в Крыму является возобновляемая энергетика.

Анализ современного состояния электроэнергетики позволил выявить наиболее значимые проблемы, решение которых должно быть первоочередным: это потери электроэнергии, эффективность, управляемость, регулирование напряжения и реактивной мощности, надёжность и качество электроснабжения. Эти и другие факторы вызывают необходимость коренных изменений как в самой электроэнергетике, так и в подготовке кадров для электроэнергетики [1].

В настоящее время в мировой энергетике осуществляется переход от затратных

механизмов, направленных на строительство новых энергетических мощностей, к коренному улучшению имеемого потенциала генерирующих источников, электрических сетей и потребителей за счёт инновационных технологий «Smart grid – умные сети».

По аналогии с зарубежной концепцией Smart Grid, переход российской электроэнергетики на интеллектуальный уровень предусматривает создание новой технологической платформы ЕЭС России – интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС). В 2010 году концепция ИЭС ААС была разработана ОАО «НТЦ Электроэнергетики» и одобрена ОАО «ФСК ЕЭС» [2]. В настоящее время к новой технологической платформе ИЭС ААС присоединились порядка ста учреждений, организаций и предприятий, и число их постоянно растёт.

В России наблюдается политическая стимуляция инновационной активности в электроэнергетике. В директивном порядке происходит внедрение новейших технологий, растёт внимание к энергоэффективности, возобновляемым источникам энергии, а также к системе Smart Grid. В нормативном виде этот процесс закреплён в Энергетической стратегии России на период до 2030 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 ноября 2009 г. № 1715-р, в Стратегии развития электросетевого комплекса РФ, утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 3 апреля 2013 г. № 511-р.

Движущими силами новой российской энергетики являются участники Технологической платформы «Интеллектуальная электроэнергетическая система России», которая является формой частно-государственного партнерства в инновационной сфере, способом мобилизации усилий заинтересованных сторон (государства, бизнеса, научного сообщества, институтов образования). Инициаторами формирования Технологической платформы являются – ОАО «ФСК ЕЭС» и ФГУ «Российское энергетическое агентство» Минэнерго России. Координатором Технологической платформы является Минэнерго России. Присоединение организаций и учреждений к Технологической платформе является добровольным [3].

Основными направлениями Технологической платформы, в области образовательной и информационной деятельности, являются:

- разработка учебных планов и образовательных программ, подготовка и переподготовка кадров, привлечение и закрепление

на предприятиях и организациях отрасли талантливой молодежи;

- распространение информации по профилю деятельности Платформы, информационная поддержка мероприятий Платформы, связь с отечественными и зарубежными родственными структурами и организациями, организация и проведение конференций, совещаний, семинаров, школ и прочих мероприятий по профилю Платформы.

Технологическая платформа является коммуникационным инструментом, направленным на активизацию усилий по созданию перспективных коммерческих технологий и новых продуктов, проведение исследований и разработок на основе участия всех заинтересованных сторон (бизнеса, науки, государства, гражданского общества).

Потребности электроэнергетики Крыма в кадровом потенциале

Сегодня в Крыму нельзя найти человека, которой не испытал бы на себе проблемы энергетики. В первую очередь эти проблемы связаны с недостатком собственных генерирующих мощностей.

Для собственной генерации Крым располагает четырьмя основными тепловыми электростанциями суммарной мощностью 162 МВт (Симферопольская 103 МВт; Камыш-Бурунская 18 МВт; Севастопольская 25 МВт; Сакская 16 МВт); семью ветровыми электростанциями мощностью 86 МВт (Останинская ВЭС 25,0 МВт; Сакская ВЭС 19 МВт; Тарханкутская ВЭС 15,9 МВт; Донузлавская ВЭС 10,9 МВт; Судакская ВЭС 6,3 МВт; Пресноводненская ВЭС 6 МВт; Восточно-Крымская ВЭС 2,8 МВт); семью солнечными электростанциями мощностью 417 МВт («Владиславовна» 110 МВт; «Перово» 105,56 МВт; «Охотниково» 82,65 МВт; «Николаевка» 69,7 МВт; «Митяево» 31,55 МВт; «Родниковое» 7,5 МВт; «Севастопольская» 10 МВт).

Для удовлетворения всех потребностей в электроэнергетике региону требуется не менее 1300-1400 МВт электрических мощностей. При этом общая установленная мощность собственной генерации в Крыму составляет 665 МВт, то есть не более 50%. При этом установленная мощность тепловых электростанций составляет 12%, солнечных – 32%, ветровых – 6% от требуемой генерации, а выработка энергии, получаемой от СЭС и ВЭС, зависит от времени суток и погодных условий. К тому же

необходимо учитывать выведенное из действия, неисправное и находящееся в ремонте оборудование. В результате этих факторов фактическая выработка от собственных источников полуострова в 2015 году составила не многим более 20%.

До ноября 2015 года основное электроснабжение осуществлялось со стороны Украины с помощью ЛЭП напряжением 220-330 кВ, общая пропускная способность которых составляла 1250 МВт. Ограничение электрических мощностей в Крыму особенно обострились после диверсии на линии ЛЭП «Мелитополь – Джанкой» в ноябре 2015 года, и последующего отключения электроснабжения Крыма от Украины.

Для оперативного покрытия дефицита электроэнергии в Крыму использовались 15 мобильных станций МГТЭС общей мощностью 337,5 МВт (Симферополь - 6 шт. 135 МВт; Севастополь – 4 шт. (90 кВт); Западный Крым – 5 шт. (112,5 МВт)). Кроме этого были задействованы резервные источники электроснабжения в количестве 2380 шт. общей мощностью 310 МВт, а полуостров был переведен на жёсткий график веерного отключения.

С вхождением Крыма и Севастополя в состав Российской Федерации в качестве основного комплексного программно-целевого механизма решения проблемных задач утверждена федеральная целевая программа «Социально-экономическое развитие Республики Крым и г.Севастополя до 2020 года». Мероприятия Программы сконцентрированы на снятии инфраструктурных ограничений и развитии экономического потенциала территории полуострова, в том числе за счет развития энергетического комплекса посредством устранения сетевых ограничений, создания собственной генерации и обеспечения надежного и бесперебойного электроснабжения потребителей Крымского полуострова.

Программой предусмотрены перечень объектов и объемы финансирования, необходимые для строительства электросетевых объектов Энергомоста 220 кВ, строительства объектов генерации, а также газотранспортной системы для обеспечения объектов генерации и развития ГТС Крымского федерального округа. Строительство Энергомоста, включающего кабельный переход через Керченский пролив, позволило в 2016 году довести переток электрической мощности в Крым со стороны Краснодарского края до 850 МВт.

Однако полная энергетическая независимость Крыма возможна только после строительства ПГУ-

ТЭС в Симферополе и Севастополе, каждая из которых будут состоять из 2-х энергоблоков. Сроки завершения строительства первых энергоблоков, мощностью по 235 МВт, намечены на 2017 год. Окончательное введение в действие двух энергоблоков обоих ПГУ-ТЭС на полную мощность 940 МВт планируется на 2018 год. При этом тарифы на электроэнергию будут доведены до экономически обоснованной цены на электроэнергию за счёт их роста на 15% каждое полугодие для населения и 6% для промышленности.

В настоящее время основным энергоснабжающим предприятием полуострова является предприятие ГУП РК «Крымэнерго», в составе которого насчитывается порядка 6 тыс. сотрудников. Предприятие располагает воздушными ЛЭП 0,4-330 кВ протяженностью 27,7 тыс. км, кабельными линиями протяжённостью 4,2 тыс. км, и трансформаторами суммарной мощностью 6 тыс. МВА. При этом износ основного силового оборудования составляет более чем 70%. Другим крупным предприятием энергетики на полуострове является ПАО «Севастопольэнерго», в котором работает около 600 человек.

Программа развития кафедры Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети

Программа развития кафедры Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети (ВИЭ и ЭСС) разработана в соответствии с основными направлениями развития образования и науки в Российской Федерации, а так же в соответствии с программой развития государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Севастопольский государственный университет" на 2016-2025 годы.

Программа направлена на формирование и развитие на кафедре научно-образовательного, интеллектуального и инновационного центра, решающего задачи образовательного, научного и воспитательного характера, и определяющего долгосрочные перспективы развития возобновляемой энергетики и электроэнергетики Республики Крым и г. Севастополя.

Приоритетным направлением развития кафедры, осуществляющей образовательную деятельность по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», избрана электроэнергетика и возобновляемая энергетика.

Выбор направления обусловлен приоритетным направлением «Энергетика», установленным университетом в программе своего разви-

тия, а так же острой потребностью государства, г. Севастополя и Республики Крым в развитии электроснабжения, возобновляемой энергетики и электроэнергетики.

Миссией кафедры является формирование человеческого потенциала для решения приоритетных задач электроэнергетики, возобновляемой энергетики и электроснабжения г. Севастополя, Республики Крым и Российской Федерации.

Стратегической целью является формирование кафедры как ключевого центра, выполняющего функции партнера и лидера подготовки кадров, научных и инновационных разработок для электроэнергетики, возобновляемой энергетики и электроснабжения г. Севастополя, Черноморского флота Российской Федерации, Республики Крым и Юга России с видом на отдалённую перспективу.

Достижение указанной цели осуществляется путем решения следующих задач:

- Высокое качество образовательной, научно-исследовательской и инновационной деятельности по направлению «Электроэнергетика и электротехника».
- Развитие прикладных научных исследований по приоритетным направлениям энергетики, электроэнергетики и электроснабжения г. Севастополя, Республики Крым и Юга России.
- Создание здорового морального и делового микроклимата в коллективе, благоприятной воспитательной среды для студентов.
- Воссоздание лаборатории возобновляемой энергетики, развитие материально-лабораторной базы и повышение эффективности её использования.
- Формирование эффективной системы управления кафедрой.

Основные мероприятия кафедры по подготовке кадров

Достижение цели и решение задач, поставленных перед кафедрой, осуществляются путем скоординированного выполнения взаимосвязанных по срокам, ресурсам и источникам финансового обеспечения мероприятий программы развития, по следующим направлениям:

- модернизация образовательной деятельности 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (бакалавр), профили электроснабжение; возобновляемые и нетрадиционные источники энергии, 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (ма-

гистр), профиль возобновляемая и нетрадиционная энергетика;

- модернизация научно-исследовательской и инновационной деятельности;
- развитие кадрового потенциала кафедры;
- модернизация материально-технической базы и социально-культурной инфраструктуры;
- повышение эффективности управления кафедрой.

В части модернизации образовательной деятельности планируется осуществление следующих мероприятий:

- разработка и реализация новых образовательных программ с учетом развития энергетики и кадровых потребностей региона по следующим направлениям, направленностям (профилям) и кодам:
 - 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (бакалавр), профиль «Электрохозяйство и электрооборудование предприятий, организаций и учреждений» - с 2020 года;
 - 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника» (магистр), профиль «Интеллектуальные электроэнергетические системы и сети» - с 2017 года;
- техническое оснащение и методическое обеспечение образовательного процесса и образовательных программ, в том числе адаптированных для образования инвалидов с различными нозологиями;
- разработка и внедрение современных образовательных технологий, в том числе электронного обучения, дистанционных образовательных технологий, развитие электронной библиотеки;
- создание современной системы непрерывного образования, обеспечивающей возможности получения дополнительного профессионального образования, второго высшего образования;
- применение современных технологий профессиональной ориентации, участие студенческих команд в международных инженерных чемпионатах - кейсах Лиги по электроэнергетике – с 2016 года.

В части научно-исследовательской и инновационной деятельности планируется участие в мега-проекте «Повышение надёжности, энергетической безопасности и эффективности электроснабжения Юга России, Республики Крым и г. Севастополя путём комплексного использования развивающихся систем электроснабжения, автономных и возобновляемых источников энергии в

совокупности с интеллектуальными технологиями «Smart Grid - умные сети», в том числе:

- развитие взаимодействия с ведущими российскими и мировыми исследовательскими центрами МЭИ, МИЭЭ, КГЭУ, в том числе вхождение в состав организаций, участвующих в финансируемых государственных проектах инновационного развития электроэнергетики России под руководством ПАО «ФСК ЕЭС» – до 2020 года;
- создание системы координации и методического сопровождения научно-исследовательской и инновационной деятельности, в том числе заключение договоров по НИР и ОКР с ГУП РК «Крымэнерго», ЗАО ГК «Таврида-электрик», ИПТС, ГУП МО РФ «102 ПЭС», ПАО «Севастополь-энерго», ООО «С.ЭНЕРДЖИ-Севастополь», ООО «ЮГРЕМХОЛОД», ОАО «ФосАгро», СЗ «Залив» - до 2018 года;
- формирование и развитие научной базы, лабораторий, инфраструктуры коммерциализации исследований и разработок, в том числе воссоздание учебной лаборатории Возобновляемой энергетики - до 2017 года и создание учебно-научной лаборатории Интеллектуальные электроэнергетические системы с активно-адаптивными сетями - с 2019 года;
- развитие международного и всероссийского сотрудничества в области научных исследований, в том числе принятие участия в финансируемых региональных проектах модернизации систем генерации электроэнергии и электроснабжения Республики Крым и г.Севастополя совместно с ГУП РК «Крымэнерго», ЗАО ГК «Таврида-Электрик», ФГУП «102 ПЭС» ЧФ Минобороны России – с 2018 года.

Финансовое обеспечение, результаты и риски реализации программы

Модель финансового обеспечения программы развития предполагает реализацию программы развития на основе государственно-частного партнерства. Бюджетное финансирование осуществляется за счет средств, выделенных государством на программу развития университета. Внебюджетное финансирование составляет доход от деятельности, преимущественно полученный от научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, а так же от образовательной деятельности.

Финансирование мероприятий программы развития кафедры осуществляется в объеме и в сроки, определяемых университетом, в соответствии с программой развития университета.

Реализация программы развития обеспечит создание в университете кафедры, осуществляющей подготовку специалистов международного уровня по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника», востребованному в первую очередь в г. Севастополе, Республике Крым, на Юге России.

Кафедра станет ключевым центром в области электроэнергетики, электроснабжения и возобновляемой энергетики, выполняющим функции партнера и лидера подготовки кадров, научных и инновационных разработок для предприятий электроэнергетики и возобновляемой энергетики г.Севастополя, Черноморского флота и Юга Российской Федерации.

Кафедра качественно дополнит инновационную инфраструктуру энергетики г.Севастополя и Республики Крым и станет одним из факторов, задающих направление их долгосрочного развития.

Успешная реализация программы развития и достижение поставленных целей обеспечат формирование действенного механизма интеграции образования, науки и бизнеса, инфраструктуры создания и продвижения новых знаний и разработок в реальные сектора энергетики, электроэнергетики и образования г. Севастополя, Республики Крым и Российской Федерации.

Основными рисками реализации программы развития являются:

- социально-экономические - замедление темпов развития экономики и восстановления промышленности региона, что снижает потребность в количестве специалистов и приводит к уменьшению численности обучающихся из г.Севастополя и Республики Крым;
- геополитические - отсутствие международного признания крымских университетов, которое приводит к ограничениям во взаимодействии с мировыми образовательными и исследовательскими центрами, сокращает возможности публикации в зарубежных изданиях, индексируемых информационно-аналитическими системами;
- объективные и субъективные последствия организационных преобразований в университете, создающие временные трудности, отсутствие финансирования на повышение квалификации ППС, неопределенности конкретных объемов и сроков финан-

сирования программы развития кафедры, отсутствие стимулирующих и компенсационных выплат сотрудникам.

В целях минимизации указанных рисков предусматривается осуществление следующих мероприятий:

- увеличение агитационной деятельности и привлекательности кафедры для абитуриентов г. Севастополя, Республики Крым и промышленных регионов других субъектов Российской Федерации, а также иностранных граждан;
- создание эффективной системы управления кафедрой, формирование системы мотивации, вовлечение работников в процессы агитации абитуриентов и реализации программы развития, внедрение морально-психологической поддержки научно-педагогических работников.

Заключение

В настоящее время в мировой энергетике осуществляется переход от затратных механизмов строительства новых энергетических мощностей к коренному улучшению имеемого потенциала генерирующих источников, электрических сетей и потребителей за счёт инновационных технологий «Smart grid – умные сети». В силу специфики российской электроэнергетики, в России эта концепция получила название «Интеллектуальные электроэнергетические системы с активно-адаптивными сетями».

Приоритетным направлением научно-исследовательской и инновационной деятельности кафедр электроэнергетического направления университета является участие в мегапроекте «Повышение надёжности, энергетической безопасности и эффективности электроснабжения Юга России, Республики Крым и г. Севастополя путём комплексного использования развивающихся систем электроснабжения, автономных и возобновляемых источников энергии в совокупности с интеллектуальными технологиями Smart Grid - умные сети».

Для дальнейшего активного участия в развитии инновационной и образовательной деятельности направления Электроэнергетика и электротехника институту Ядерной энергии и промышленности необходимо присоединиться к Технологической платформе «Интеллектуальная электроэнергетическая система России».

Актуальными задачами кафедр электроэнергетической направленности являются формирование и развитие научной базы, создание

современных лабораторий, инфраструктуры коммерциализации исследований и разработок, в том числе воссоздание учебной лаборатории Возобновляемой энергетики и создание учебно-научной лаборатории Интеллектуальные электроэнергетические системы с активно-адаптивными сетями.

В институте Ядерной энергии и промышленности на базе кафедр электроэнергетической направленности целесообразно открыть магистратуру по перспективному профилю «Интеллектуальные электроэнергетические системы и сети», и предусмотреть набор магистров по новому профилю, начиная с 2017 года.

Список литературы

1. Дьяков А. В. Об ошибках высшей школы России при подготовке специалистов для электроэнергетики и электротехники / А.В. Дьяков, В. В. Платонов // Вести в электроэнергетике, 2013. - №5 - С. 25-26.
2. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. [Электронный ресурс] — (13 КБ). М., 2010. — Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf
3. Меморандум об образовании Технологической платформы «Интеллектуальная электроэнергетическая система России». [Электронный ресурс] — (0,08 МБ). М., 2010. — Режим доступа: http://www.rosinf.ru/regulations_and_...

References

1. Dyakov A. V. About mistakes of the higher school of Russia at training of specialists for power industry and electrical equipment / A. V. Dyakov, V. V. Platonov//Vestie in power industry, 2013. - No. 5 - Page 25-26.
2. Basic provisions of the concept of an intellectual power supply system with active and adaptive network. [An electronic resource] — (13 CBs). M, 2010. — Access mode: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf.
3. Memorandum of formation of the Technological platform "Intellectual Electrical Power System of Russia". [An electronic resource] — (0,08 MB). M, 2010. — Access mode: http://www.rosinf.ru/regulations_and_...

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 621.762:678.01

Влияние нанопорошка, полученного из лома твердых сплавов марки ТТК, на эксплуатационные свойства эпоксидного клеяВ.М. Гавриш¹, Г.А. Баранов², Е.А. Храброва³, Т.В. Чайка⁴, О.П. Гавриш⁵*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹5brachman5@gmail.com, ³Khrabrova81h@rambler.ru, ⁴KimChayka@yandex.ru*

Статья поступила 05.09.2016 г.; после доработки 08.09.2016 г.

Аннотация

Приведены исследования по улучшению эксплуатационных свойств эпоксидного клея марки ТУ 2252-003-62517430-01. Для улучшения этих свойств используют нанопорошок, полученный из лома твердых сплавов марки ТТК. Рассмотрено влияние концентрации нанопорошка на изменение эксплуатационных свойств эпоксидного клея. В качестве эксплуатационных свойств исследовали предел прочности при сжатии и растяжении. Исследования показали, что добавление нанопорошка, полученного из лома твердых сплавов марки ТТК к эпоксидному клею приводит к улучшению его свойств – увеличению предела прочности при сжатии и растяжении. Подобрана концентрация модификатора, при котором достигается максимальный эффект.

Ключевые слова: эпоксидный клей, нанопорошок, лом твердых сплавов марки ТТК, предел прочности при сжатии, предел прочности при растяжении

The effect of the nanopowder, derived from of TTK brand alloy solid, on the epoxy glue performanse propertiesV.M. Gavrish¹, G.A. Baranov², E.A. Khrabrova³, T.V. Chayka⁴, O.P.Gavrish⁵*Sevastopol State University 33 Universitetskaya st, Sevastopol, 299053, Russia,
¹5brachman5@gmail.com, ³Khrabrova81h@rambler.ru, ⁴KimChayka@yandex.ru*

Received 05.09.2016 y.; received in final form 08.09.2016 y.

Abstract

The improvement of operational properties of epoxy adhesive brand TU 2252-003-62517430-01 are shown. For the improvement of these properties there is nanopowders, made of TTK brand hard alloy scrap was used. The effect of the concentration of nanopowders to change the performance properties of epoxy glue was shown. As an operational properties investigated the compressive strength and tensile. Studies have shown that the addition of nanopowders made of TTK brand solid alloy is increase the properties of epoxy adhesive - compressive strength and tensile was increased. The modifier concentration, at which the maximum effect – was chosen.

Keywords: epoxy adhesive, nanopowder, TTK brand hard alloy scrap, compressive strength, tensile strength

Введение

Эпоксидные смолы характеризуются высокой адгезией к материалам различной природы, поэто-

му их широко используют в качестве основного компонента лакокрасочных материалов, клеев, герметиков, композиционных материалов и т.д. В

настоящее время с совершенствованием технологий возрастает потребность промышленности в современных материалах из эпоксидных смол с улучшенными эксплуатационными и технологическими характеристиками. Однако заключается это не столько в разработке новых полимеров, сколько в модификации известных материалов.

Использование дисперсных металлических наполнителей позволяет обеспечить необходимые физические и механические характеристики композитных материалов. В настоящее время активно исследуются механические свойства смол с металлическими наполнителями.

В данной работе в состав эпоксидного клея вводят модификатор – нанопорошок с содержанием 84,83% карбида вольфрама, который получают при переработке отходов на основе вольфрамсодержащих сплавов при утилизации различных отходов промышленности, военно-промышленного комплекса и металлургии. Работа является актуальной, так как прочностные свойства синтетических смол улучшаются при введении в них дисперсных порошков.

Анализируя исследования различных авторов видно, что в качестве модификаторов применяют различные оксиды в виде нанопорошков, которые положительно влияют на механические свойства эпоксидной смолы. Так, например, авторы [1] анализировали механические свойства эпоксидной смолы при добавлении к ней наночастиц диоксида титана. В работе [2] обследовали механические характеристики – ударную прочность композиционных материалов, в которые введены наночастицы оксида церия различной формы – палочек, кубиков, пластинок. Результаты исследований показали, что ударная прочность в 4 раза выше, чем для обычной эпоксидной смолы. Наночастицы оксида церия использовали и для модификации свойств эпоксидной матрицы чтобы улучшить свойства эпоксидных тонких пленок. Для этого исследовали влияние концентрации наночастиц CeO_2 . Результаты показали, что, при увеличении концентрации наночастиц CeO_2 до 3% по массе, модуль упругости при растяжении увеличивается, а такие механические свойства, как предел прочности на разрыв и удлинение, уменьшаются [3].

Авторы работы [4] представили положительные результаты влияния нанопорошка оксида цинка на механические свойства эпоксидных покрытий при температуре окружающей среды. В качестве образцов для покрытий использовали стальные и стеклянные подложки. Нанопорошок оксида цинка добавляли в количестве 1 – 2 %.

Целью работы [5] являлось исследование влияния нанопорошков алюминия и меди на термическую стабильность и механическую прочность эпоксидных композитов. Результаты эксперимента показали, что эпоксидный полимер с нанопорошком Al (5 %) и микродисперсным порошком H_3BO_3 (10 %) проявляет наилучшую термическую стабильность среди образцов с другими наполнителями, представленными в данной работе. Использование нанопорошка Al совместно с порошком H_3BO_3 приводит к улучшению механических характеристик, поскольку полученный композит лучше противостоит деформации.

Нанопорошок оксидов циркония (ZrO_2) и алюминия (Al_2O_3) также положительно влияет на физико-механические и адгезионные свойства эпоксидных полимеров. Их добавление приводит к значительному росту показателей когезионной прочности, деформации при разрыве и модуля упругости при сравнительно небольшом изменении износостойкости, адгезионной прочности и теплостойкости эпоксиполимеров [6].

Авторы работы [7] в состав эпоксидной смолы вводили оксид титана и карбид вольфрама в различных массовых соотношениях и сравнивали эксплуатационные свойства.

Но наиболее распространенным модификатором для эпоксидных смол является, согласно литературным данным, нанопорошок диоксид кремния.

Быстрое отверждение эпоксидных полимеров с наночастицами диоксида кремния рассмотрено в работе [8]. Отмечено его положительное влияние на механические и кинетические свойства при добавлении до 20 % масс. в виде нанопорошка без какой либо дополнительной обработки. Целью работы [9] являлась разработка метода модификации эпоксидных связующих наночастицами диоксида кремния и технологии получения композиционных материалов на их основе с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Результаты показали, что наночастицы необходимо вводить в наименее вязкую среду (отвердитель), поскольку в такой среде препятствия для разбиения агломератов и равномерного распределения частиц должны быть минимальны. Также при введении наночастиц оптимальными пропорциями увеличивается прочность на растяжение на 32 %. В статье [10] представлены результаты модификации эпоксидных композитных материалов наноразмерными порошками диоксида кремния; определено влияние свойств их поверхности на эффективность модификации и рассмотрено

влияние гидрофильных и гидрофобных поверхностных групп, так же получено соотношение между положительными и отрицательными факторами, связанными с добавлением такого порошка.

Так же в качестве неорганических наполнителей использовали наночастицы диоксида кремния и диоксида циркония, которые были взяты для эксперимента в двух различных диапазонах размерами 30 – 60 нм, а другой в диапазоне 5 – 15 нм. Исследовали термические и механические свойства для различных количеств наночастиц. Наблюдалось улучшение твердости и модуля упругости. Влияние размера частиц на термические свойства не повлияло [11].

Постановка цели и задач научного исследования

Эпоксидные смолы, модифицированные нанопорошками, полученными из ломов твердых сплавов марки ТТК, с содержанием карбида вольфрама, практически не изучены. Поэтому целью данной работы являлось исследование влияния нанопорошков, полученных из ломов твердых сплавов, содержащих карбид вольфрама и другие примеси на увеличение предела прочности при сжатии и растяжении эпоксидных композитов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- экспериментально исследовалось влияние модификатора, полученного из отходов и изделий твердых сплавов на изменение эксплуатационных свойств – предела прочности при сжатии и при растяжении эпоксидного клея;
- определялась оптимальная концентрация модификатора для эпоксидного клея.

Экспериментальная часть

Вольфрам имеет высокую твердость и износостойкость. Поэтому для разработки новых композитных материалов в Севастопольском государственном университете в научно-исследовательской лаборатории Биотехнологии и экологического мониторинга были проведены исследования по оценке влияния порошка наномодификатора, на эпоксидный клей марки ТУ 2252-003-62517430-01.

В данной работе в качестве модификатора использовали нанопорошок, содержащий в своем составе 84,83% карбида вольфрама и примеси других карбидов и металлов, полученный в ре-

зультате переработки твердосплавных отходов [13]. Характеристики и результаты проведенного химического анализа полученного порошка, представлены в таблице 1.

Таблица 1. Характеристики и химический состав нанопорошка.

Характеристики нанопорошка	
Размер порошка, нм	100 – 200
Размер кристаллита, нм	40 – 65
Площадь поверхности, м ² /г	5,17
Плотность, г/см ³	15,30
Химический состав нанопорошка, %	
WC	84,830
TiC	12,460
TaC	2,1190
Mo ₂ C	0,0192
VC	0,0260
Fe	0,0100
Ni	0,0080
Свободный углерод	0,15±0,04

Фотография частиц и типичные формы порошка представлены на рис. 1 и рис. 2.

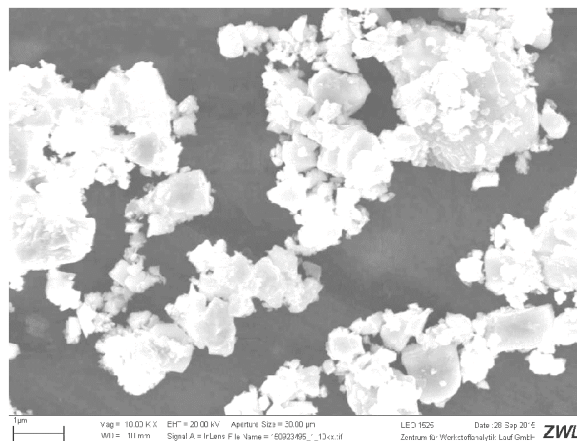


Рис. 1. Наночастицы порошка, полученного из лома твердых сплавов марки ТТК.



Рис. 2. Типичные формы частиц нанопорошка.

Полученный порошок модификатора с содержанием карбида вольфрама 84,83% различной концентрации 1 – 5 масс. % смешивали с эпоксидным клеем. Готовую смесь заливали в формы и оставляли для отверждения на пять суток при температуре 20 – 25 °С. Аналогично готовили пробу без содержания модификатора. По окончании затвердевания измеряли предел прочности при сжатии согласно ГОСТу 4651-82 [14], предел прочности при растяжении, согласно ГОСТу 11262-80 [15].

Результаты исследований

Анализируя результаты исследования изменения эксплуатационных свойств исследуемых образцов на основе эпоксидного клея, представленных на рис. 3, выявлено, что добавление модификатора ведет к увеличению предела прочности при сжатии полученных образцов. Причем, при концентрации модификатора 2% и 3% показатель прочности не меняется, при дальнейшем увеличении содержания нанопорошка до 5% – возрастает.

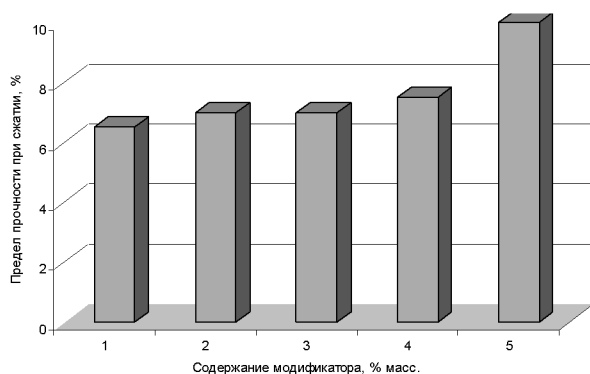


Рис. 3. Зависимость предела прочности при сжатии от содержания модификатора.

Это связано с тем, что наночастицы, имея определенный заряд, распределяются в объеме полимерной матрицы, вызывают процессы молекулярного упорядочения в аморфной фазе полимера, образуют локальные упорядоченные микроструктуры, которые играют роль физических узлов сшивки молекул полимера, вызывают упрочнение его аморфной фазы, определяющей физико-механические характеристики полимерной матрицы.

Рассматривая полученные результаты аналогичного эксперимента (рис. 4), полученные при изучении изменения предела прочности при растяжении опытных образцов, наблюдается улучшение их прочности при концентрации мо-

дификатора 2%, что объясняется, увеличением числа физических узлов сшивки макромолекул полимера. При дальнейшем увеличении содержания наночастиц модификатора (более 3 масс. %) наблюдается снижение предела прочности при растяжении, что связано с возможным блокированием наночастицами эпоксигрупп, а также развитием взаимодействия наночастиц друг с другом и их агломерированием. Образующиеся агломераты наночастиц препятствуют вязкопластическому течению полимерного материала под действием сдвигового напряжения.

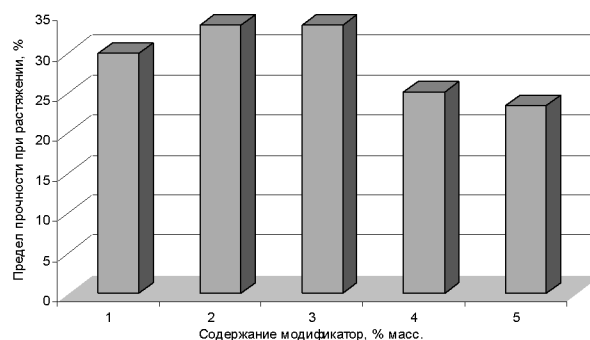


Рис. 4. Зависимость предела прочности при растяжении от содержания модификатора.

В результате обоих исследований наблюдался одинаковый предел концентрации модификатора 2 – 3%, при котором его влияние на предел прочности при сжатии и предел прочности при растяжении остается неизменным.

Таким образом, оптимальной концентрацией модификатора с содержанием карбида вольфрама и других соединений и веществ для эпоксидного клея является 2%, при которой наблюдается увеличение предела прочности при сжатии на 6,9 %, предела прочности при растяжении более чем на 33 %. В свою очередь данный эффект можно использовать либо для получения упрочненных изделий, либо для снижения массы изделия, если характеристик прочности достаточно. Снижение массы изделия в свою очередь приведет к экономии затрат на эпоксидную смолу, логистику и т.д. и соответственно к снижению себестоимости изделия.

Заключение

Экспериментально исследовано влияние модификатора на предел прочности при сжатии и при растяжении эпоксидного клея. Результаты показали, что предел прочности при сжатии увеличивается на 6,9 %, а предел прочности при

растяжении – на 33% при оптимальной концентрации модификатора 2% масс.

Полученные композитные материалы обладают хорошими эксплуатационными свойствами и могут быть применены в различных отраслях промышленности.

Список литературы

1. Annlin Bezy N. Effect of TiO_2 nanoparticles on Mechanical Properties of Epoxy-Resin System / N. Annlin Bezy, A. Lesly Fathima // *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2015. – P. 143 – 151.
2. Xiaoqiang He. Shape and size effects of ceria nanoparticles on the impact strength of ceria/epoxy resin composites / Xiaoqiang He, Dengsong Zhang, Hongrui Li, Jianhui Fang, Liyi Shi // *Particuology*, 2011. – Issue 9. – P. 80 – 85.
3. Dao N.N. UV absorption by cerium oxide nanoparticles/epoxy composite thin films / N.N. Dao, M.D. Luu, Q.K. Nguyen // *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2011. – Issue 2, No. 4. – 4 p.
4. Rawaiz Khan. Effect of ZnO Nano Powder on Mechanical Properties of Epoxy/Polyaminoamide Adduct Coatings / Rawaiz Khan, Ubair Abdus Samad, Mohammad Asif Alam, M. Boumaza, Saeed M. Al-Zahrani // *International Journal of Advances in Computer Science and Technology*, 2013. – Vol. 2, No. 11. – P. 25 – 28.
5. Мельникова Т.В., Назаренко О.Б. Влияние наполнителей на основе борной кислоты и нанопорошка меди на термические и механические характеристики эпоксидных композитов / Т.В. Мельникова, О.Б. Назаренко // *Материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: эффективность, надёжность, безопасность»*, г. Томск, 2 – 4 декабря 2015. – Томск: СКАН, 2015. – Т. 2. – С. 146 – 148.
6. Золоторева В.В. Влияние нанопорошков на механические и адгезионные свойства эпоксидных полимеров / В.В. Золоторева, Ю.С. Кочергин // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*, 2016. – Вып. 1(117). – С. 62 – 67.
7. Anil S. Pol. Mechanical Properties of TiO_2 and WC Reinforced Epoxy Resin Composites / Anil S. Pol, Nachiket Chanshetti, Ashok. // *International Journal for Scientific Research & Development*, 2016. – Vol. 4, Issue 06. – P. 162 – 164.
8. Keller A. Fast-curing epoxy polymers with silica nanoparticles: properties and rheo-kinetic modelling / A. Keller, K. Masania, A.C. Taylor, C. Dransfeld // *Journal of Materials Science*, 2015. – Vol. 51, Issue 1. – P. 236 – 261.
9. Брусенцева Т.А. Композиционные материалы на основе эпоксидной смолы и наночастиц / Т.А. Брусенцева, А.А. Филиппов, В.М. Фомин // *Известия*

алтайского государственного университета, 2014. – Т. 1, № 1 (81). – С. 25 – 27.

10. Брусенцева Т.А. Введение нанопорошков и механические свойства материалов на основе эпоксидных смол / Т.А. Брусенцева, К. Зобов, А. Филиппов, Д. Базарова, С. Лхасаранов, А. Чермошенцева, В. Сызранцев // *Наноиндустрия*. – 2013. – Т. 41, № 3. – С. 24 – 31.
11. Sajjad M. Properties of Epoxy/ SiO_2 – and Epoxy/ ZrO_2 – Nanocomposites / M. Sajjad., B. Feichtenschlager, S. Pabisch, T. Koch, S. Seidler, H. Peterlik, G. Kickelbick [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_192164.pdf
12. Алымов М.И. Синтез нанопорошков на основе вольфрама / М.И. Алымов, А.Б. Анкудинов, И.В. Трегубова, А.А. Заблочкин // *Физика и химия обработки материалов*, 2005. – № 6. – С. 81 – 82.
13. Баранов А.Г. Получение наноразмерных порошков при переработке отходов на основе вольфрамосодержащих сплавов, исследование их гранулометрического состава / А.Г. Баранов, С.В. Бондарец, М.В. Гавриш, С.Б. Смирнов, Д.Д. Саникович // *Збірник наукових праць СНУАЭтаП*, 2011. – № 2(38) – С. 158 – 165.
14. ГОСТ 4651-2014. Пластмассы. Методы испытания на сжатие. – Взамен ГОСТ 4651-82; введен. 2015 – 03 – 01. – М.: Стандартинформ. – 20 с. – (Межгосударственный стандарт).
15. ГОСТ 11262-80. Пластмассы. Методы испытания на растяжение. – Взамен ГОСТ 11262-76; введен. 1980 – 12 – 01. – М.: Воынская типография издательства стандартов. – 14 с. – (Государственный стандарт союза ССР).

References

1. Annlin Bezy N., Annlin Bezy N., Lesly Fathima A. Effect of TiO_2 nanoparticles on Mechanical Properties of Epoxy-Resin System. *International Journal of Engineering Research and General Science*, 2015, Vol. 3, Issue 5, pp. 143 – 151.
2. Xiaoqiang He, Dengsong Zhang, Hongrui Li, Jianhui Fang, Liyi Shi. Shape and size effects of ceria nanoparticles on the impact strength of ceria/epoxy resin composites. *Particuology*, 2011, Issue 9, pp. 80 – 85.
3. Dao N.N., Luu M.D., Nguyen Q.K., Kim B.S. UV absorption by cerium oxide nanoparticles/epoxy composite thin films. *Advances in Natural Sciences: Nanoscience and Nanotechnology*, 2011, Issue 2, 4 p.
4. Rawaiz Khan, Ubair Abdus Samad, Mohammad Asif Alam, M. Boumaza, Saeed M. Al-Zahrani. Effect of ZnO Nano Powder on Mechanical Properties of Epoxy/Polyaminoamide Adduct Coatings. *International Journal of Advances in Computer Science and Technology*, 2013, Vol. 2, No. 11, pp. 25 – 28.
5. Melnikova T.V., Nazarenko O.B. The effect of boric acid fillers and copper nanopowder on thermal behavior and stress-related properties of epoxy composites. *Materialy XXI Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy*

- konferentsii "Energetika: effektivnost, nadezhnost, bezopasnost"* [All-Russian Scientific and Practical Conference "Energy: efficiency, reliability, safety"], Tomsk, SKAN publ., 2005, Vol. 2, pp. 146 – 148.
6. Zolotareva V.V., Ya.S. Kochergin Effect of nanopowders to mechanical and adhesive. *Vestnik Donbasskoy natsionalnoy akademii stroitelstva i arkhitektury*, 2016, Issue 1(117), pp. 62 – 67.
 7. Anil S. Pol, Nachiket Chanshetti, Ashok. Mechanical Properties of TiO₂ and WC Reinforced Epoxy Resin Composites. *International Journal for Scientific Research & Development*, 2016, Vol. 4, Issue 06, pp.162 – 164.
 8. Keller A., Masania K., Taylor A.C., Dransfeld C. Fast-curing epoxy polymers with silica nanoparticles: properties and rheo-kinetic modelling. *Journal of Materials Science*, 2015, Vol. 51, Issue 1, pp. 236 – 261.
 9. Brusentseva T.A., Filippov A.A., Fomin V.M. Composite materials based on epoxy resin and nanoparticles. *Izvestiya altayskogo gosydarstvennogo yниверситета*, 2014, Vol. 1, No.1 (81), pp. 25 – 27.
 10. Brusentseva T.A., Zobov K., Filippov A.A., Bazarova D., Lkhasaranov S. Chermoshentseva A., Syzrantsev V. Nanopowders and mechanical properties of the materials on epoxy resins. *Nanoindystriya*, 2013, T. 41, No. 3, pp. 24 – 29.
 11. Sajjad M., Feichtenschlager B., Pabisch S., Koch T., Seidler S., Peterlik H., Kickelbick G. Properties of Epoxy/SiO₂ – and Epoxy/ZrO₂ – Nanocomposites. Available at: http://publik.tuwien.ac.at/files/PubDat_192164.pdf
 12. Alymov M.I., Ankudinov A.B., Tregubova I.V., Zablotskiy A.A. Tungsten-based nanopowder synthesis. *Fizika i himiya obrabotki materialov*, 2005, No.6, pp. 81 – 82.
 13. Baranov G.A., Bondarets S.V., Gavriush V.M., Smirnov S.B., Sanikovich D.D. Production of nanodimensional powders by the recycling of tungsten contained scrap. Study of their granulometric content. *Sbornik nauchnykh trudov SNUYAEiP* [Collection of scientific papers], Sevastopol, SNUof NEand I Publ., 2011, pp. 158 – 165.
 14. GOST 4651-2014. Plastics. Compression test method. Moscow, Standartinform Publ., 2014, 20 c. (In Russian).
 15. GOST 11262-80. Plastics. Tensile strength test method. Moscow, Volyn typography publishing standards Publ., 1980, 14 c. (In Russian).

УДК 576.89:597 (261)

К вопросу о показателях экологического состояния прибрежных экосистем

С.И. Рубцова¹, Н.В. Лямина^{1,2}, А.Г. Лямин¹, Ю.А. Омельчук², Г.В. Кучерик²¹ФГБНУ «Институт природно-технических систем», ул. Ленина, 28, г. Севастополь, 299011, РФ,
e-mail: ¹rsi1976@mail.ru, ²BurmistrovaN@mail.ru²ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299026, РФ

Статья поступила 12.09.2016 г.; после доработки 15.09.2016 г.

Аннотация

В работе рассмотрены критерии оценки экологического состояния прибрежных зон Азово-Черноморского региона, включая биологические, химические, биофизические параметры. На основе многолетних данных рассмотрено экологическое состояние Севастопольских бухт, изучено взаимодействие морских организмов и их сообществ с загрязнением, сделаны предложения по улучшению экологического состояния акваторий. Показана возможность использования параметров поля биолуминесценции *in situ* при оперативной оценке функционирования водных экосистем.

Ключевые слова: прибрежная зона, экосистема, поле биолуминесценции, Азово-Черноморский регион.

About environmental condition indicators of coastal ecosystems

S.I. Rubtsova¹, N.V. Lyamina^{1,2}, A.G. Lyamin¹, Yu.A. Omelchuk², G.V. Kucherik²¹Federal State Budgetary Scientific Institution «Institute of Natural-Engineering Systems», 28, Lenina st., Sevastopol, 299011, RF, e-mail: ¹rsi1976@mail.ru, ²BurmistrovaN@mail.ru²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», 7, Kurchatova st., Sevastopol, 299026, RF

Received 12.09.2016 y.; received in final form 15.09.2016 y.

Abstract

The paper focuses on environmental condition assessment criteria for coastal areas of Azov and Black seas region, including biological, chemical, biophysical parameters. Based on long-term data, we researched environmental condition of Sevastopol bays, the impact of pollution on marine organisms and corresponding biotic communities and proposed environmental condition improvement plans for water areas. The paper illustrates application of bioluminescence field parameters *in situ* for operational evaluation of water ecosystems' functioning.

Keywords: coastal area, ecosystem, bioluminescence field, Azov and Black Seas Region

Введение

Усиление антропогенного влияния на экосистему Черного и Азовского морей выражается в деградации биологических, рекреационных и других ресурсов. В связи с этим назрела необходимость поиска путей оптимизации использования природных ресурсов и возобновления воспроизводства экосистем Черного и Азовского морей. Часто антропогенное воздействие на экосистемы связано с транспортиров-

кой и использованием в разных отраслях хозяйственной деятельности ископаемых видов топлива, в частности, нефтепродуктов. Поэтому внедрение альтернативных экологически чистых видов энергии таких как гелиоэнергия, ветровая, гидро- и геотермальная призвано уменьшить пресс антропогенного загрязнения на экосистемы, особенно на состояние прибрежных морских экосистем.

Экологические исследования стали неотъемлемой и обязательной частью изучения территории Крыма и прилегающих акваторий Черного и Азовского морей, конечной целью которых является, как правило, оценка экологического состояния. Такие исследования особенно актуальны для морской береговой зоны, которая отличается сложным геологическим строением, чрезвычайным разнообразием природных процессов и мощной антропогенной нагрузкой. Однако до настоящего времени нет единого методического подхода к определению критериев оценки экологического состояния прибрежной зоны.

Постановка цели научного исследования

Выявление зон экологического бедствия и зон чрезвычайных экологических ситуаций проводится с целью определения источников и факторов ухудшения экологической обстановки и разработки обоснованной программы неотложных мер по стабилизации и снижению степени экологического неблагополучия на обследуемой территории.

Описание исследования

Экологическая обстановка может классифицироваться по возрастанию степени экологического неблагополучия следующим образом [1, 2]:

1. относительно удовлетворительная;
2. напряженная;
3. критическая;
4. кризисная (или зона чрезвычайной экологической ситуации);
5. катастрофическая (или зона экологического бедствия).

Выявление зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия для морских акваторий проводится по основным химическим и биологическим показателям на основе анализа и обобщения результатов многолетних наблюдений [3, 4].

Для оперативной оценки загрязнения неритических акваторий возможно применять биоллюминесцентные характеристики планктонных организмов и создаваемое ими световое поле (поле биоллюминесценции) [5]. Основная роль в создании поля биоллюминесценции принадлежит планктонным организмам. Свечение вод Чёрного моря в значительной мере обусловлено планктонными динофлагеллятами родов *Neoceratium*,

Protoperidinium, *Scrippsiella*, *Gonyaulax*, *Noctiluca*, *Lingulodinium*, *Pyrocystis*. У 30 видов Dinophyceae характеристики светоизлучения определены инструментально в условиях Чёрного моря сотрудниками отдела биофизической экологии Института морских биологических исследований им. А.О. Ковалевского [6, 7].

Существование Dinophyceae в условиях комплексного загрязнения способствует формированию более низких порядков светоизлучения. Источником биоллюминесценции у динофитовых водорослей является совокупность сцинтиллонов – образований диаметром 0.1-0.6 мкм, локализованных в приповерхностном тонопласте [8]. Поступление во внешнюю среду ионов свинца, меди и ртути приводит к дегенеративным изменениям в мембранах, ответственных за энергетические процессы в организме [9]. Это неудовлетворительно сказывается на физиологическом состоянии организмов, вызывает уменьшение количества способных к высвечиванию сцинтиллонов и сопровождается изменением амплитуды светоизлучения Dinophyceae. Известны также и другие возможные механизмы воздействия токсикантов на биоллюминесценцию планктонных водорослей. Так, избыточное количество свинца и других тяжёлых металлов в среде приводит к частичному ингибированию энзимов [10].

Для совокупной оценки опасных уровней химического загрязнения морских вод в случае выявления нескольких загрязняющих веществ в концентрациях, превышающих предельно допустимые концентрации (ПДК), применяется, формализованный суммарный показатель химического загрязнения (ПХЗ-10 - из 10 преобладающих по превышению ПДК загрязняющих веществ). Этот показатель применяется только для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия [3, 4].

К дополнительным показателям по химическому загрязнению отнесены БПК-5 и растворенный кислород [11].

Для оценки чрезвычайной экологической ситуации по биологическим показателям используются структурные и функциональные характеристики бактерио-, фито- и зоопланктона, бентоса и ихтиофауны, а также отдельных таксонов и видов гидробионтов.

Экологическое бедствие в морской экосистеме характеризуется резким изменением чис-

ленности и биомассы, еще оставшихся в составе сообществ видов, а при эвтрофикации морских акваторий - мощным "цветением" водорослей, исчезновением донной флоры и фауны, резким увеличением концентраций индикаторных микроорганизмов. Даже при снижении нагрузок продолжается процесс разрушения структурно-функциональных связей. Изменения в экосистемах приобретают необратимый характер.

К дополнительным биологическим показателям оценки состояния морских экосистем отнесен показатель – «морфологические изменения гидробионтов». Что касается микроэлементов и некоторых других веществ, то их роль в жизни биоты имеет двойственное значение. Многие элементы различной степени токсичности в больших количествах являются в то же время жизненно необходимыми в малых количествах. Для нормальной жизнедеятельности экосистем существуют оптимальные содержания различных химических веществ в различных средах, предельные значения которых являются лимитирующими факторами экосистем и служат основой для определения критериев оценки. В группу критериев включаются только те факторы, которые влияют на жизнедеятельность экосистем. Это в первую очередь относится к человеку и всем видам его взаимодействия с прибрежной зоной, как со средой обитания, так и с объектом многочисленных видов его хозяйственной деятельности.

Группа критериев оценки экологического состояния донных осадков включает геохимические и биологические критерии. Это химические элементы (Cd, Hg, Pb, Zn, Cu, As, $P_{общий}$, $N_{общий}$), цианиды, фенолы, нефтепродукты, ароматические углеводороды), коэффициент донной аккумуляции (КДА), который определяется по формуле: $КДА = САД / Св$, где САД – суммарная концентрация токсичных веществ в донных осадках, Св – то же в воде. Биологический критерий представлен коли-титром.

Для оценки экологического состояния собственно экосистем можно применять следующий комплекс критериев, в который входят: уменьшение биоразнообразия (индекс Симпсона, в % от нормы), плотность популяции отрицательного и положительного видов-индикаторов, площадь коренных ассоциаций, изменение видового состава, коэффициент накопления в гидробионтах поллютантов, возрастной спектр генопопуляций доминантов, возобновление, соотношение ассоциаций с разной степенью

нарушенности экосистем, структурно-функциональные характеристики состояния и трофическая структура экосистем.

Рекомендуется использовать любые иные показатели, дающие дополнительные сведения о характере, причинах и степени неблагоприятной ситуации. К числу рекомендуемых отнесены следующие:

1. Интегральная оценка загрязнения морских вод и донных отложений веществами, имеющими мутагенный эффект на тест-объектах (стандартные штаммы микроорганизмов). Мутагенный эффект выражается в процентах проб, где вызваны мутации стандартных штаммов. Относительно удовлетворительная ситуация характеризуется уровнем менее 5%. Чрезвычайная экологическая ситуация - 20 - 30%, экологическое бедствие - более 30%. Оценка загрязнений донных отложений соединениями с мутагенной активностью отражает длительность экологической ситуации на акватории.

2. Критические концентрации воздействия загрязняющих веществ (КК). Значения КК характеризуют максимально допустимый уровень загрязнения (мкг/л) водной среды токсичными веществами. При чрезвычайной экологической ситуации, при которой изменения в функционировании морских экосистем являются еще обратимыми, КК от 1 до 2. При экологическом бедствии, выражающемся в резкой деградации морской экосистемы, КК более 2-3.

Таким образом, критериями оценки экологического состояния морских акваторий являются:

- химические вещества при стабильном сохранении химического загрязнения в течение трех лет;
- формализованный суммарный показатель химического загрязнения вод для 10 максимально превышающих ПДК загрязняющих веществ;
- кислород растворенный;
- биомасса планктона и макрозообентоса;
- число видов в планктонных сообществах (видовое разнообразие);
- запасы икhtiофауны и промысловых беспозвоночных;
- состояние сообществ зообентоса;
- численность индикаторных форм микроорганизмов;
- доля гидробионтов-вселенцев;
- уровень первичной продукции;
- состояние макрофитов;

- морфологические изменения гидробионтов (размеры и масса тела, появление уродливых форм и т.п.).

Экологический мониторинг (мониторинг окружающей среды) — это комплексная система наблюдений за состоянием окружающей среды, оценки и прогноза изменений состояния окружающей среды под воздействием природных и антропогенных факторов. Нами на зара-

нее выбранных полигонах в прибрежной зоне Черного моря производятся плановые исследования динамики загрязняющих веществ [12, 17], включая нефть и нефтепродукты, а также численности основных организмов, участвующих в трансформации загрязнений (Рис. 1).

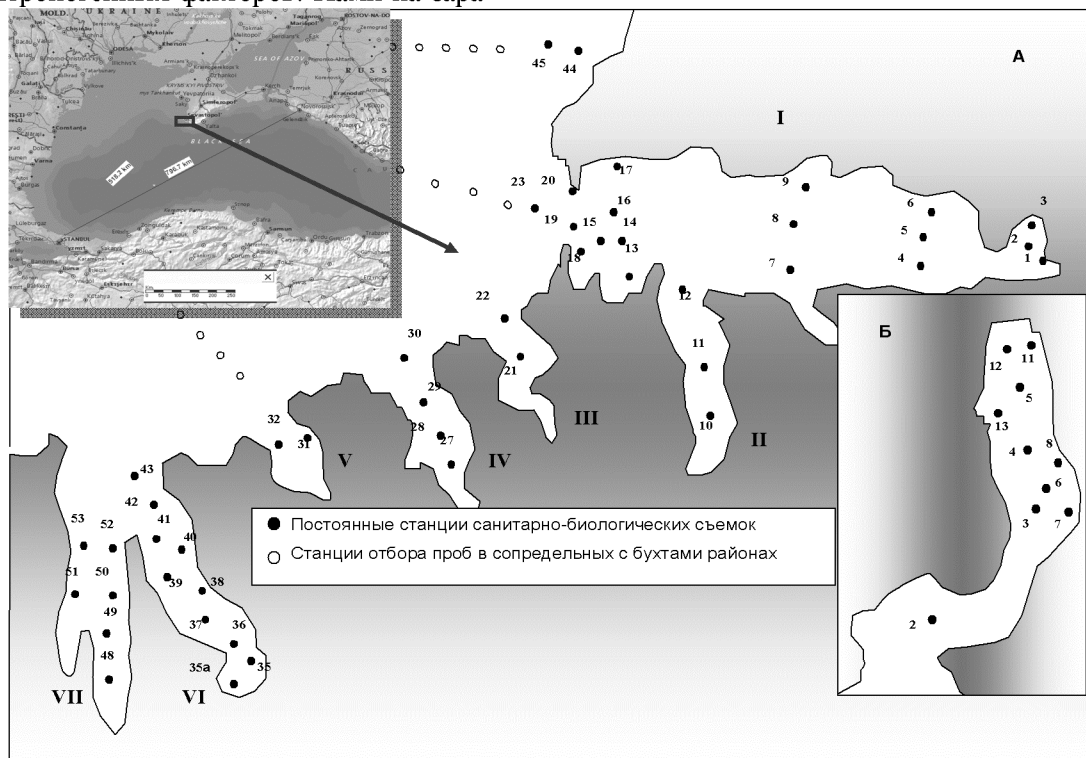


Рис. 1. Схема станций отбора проб донных осадков (А: I – Севастопольская, II – Южная, III – Карантинная, IV – Стрелецкая, V – Круглая, VI – Камышовая, VII – Казачья бухты, Б – Балаклавская бухта) [12, 17]

Для оценки экологического состояния морской береговой зоны Черного и Азовского морей нами были предложены и применены на практике следующие группы критериев:

1. Оценка бактериологического состояния морской воды и донных отложений прибрежных зон с различной степенью антропогенной и рекреационной нагрузки с определением общего количества гетеротрофных бактерий как показателя фоновой характеристики морской среды; микробного числа – показателя загрязнения хозяйственно-фекальными сточными водами; общего количества бактерий, разрушающих основные классы органических веществ (белков, углеводов, липидов, углеводородов, включая нефтяные); изучение анаэробной группы бактерий (тионовых, денитрификаторов, сульфатредукторов) как показателей преобразования антропогенного загрязнения в

условиях дефицита кислорода. Гетеротрофные бактерии являются одним из показателей санитарно-гигиенического состояния водоема. Изучение этой группы микроорганизмов позволяет оценить не только качество морской воды, но и прогнозировать процессы самоочищения, что, в конечном счете, даст возможность управления состоянием морской среды рекреационных акваторий. При определении биохимических особенностей нефтеокисляющих микроорганизмов изучается их способность окислять органические вещества основных классов (белки, липиды, углеводы и их производные), таким образом, фактически охватывается весь процесс бактериальной деструкции органического вещества как основной фактор самоочищения в море [17].

2. Определение численности и биомассы экологических групп макрозообентоса – для

оценки экологического качества среды и роли биоты в процессах самоочищения. Исследование сообществ макрозообентоса является неотъемлемой составной частью регулярного экологического мониторинга и необходимо для определения роли биоты в процессах самоочищения. Изучение количественных характеристик различных экологических групп бентоса позволяет оценивать экологическое качество акваторий в грациях, определенных Европейской Водной рамочной директивой (WFD 2000/60/ЕС).

3. Оценка физико-химического состояния прибрежных наносов и донных осадков, особое внимание уделяя нефтяному загрязнению.

4. Изучение потоков нефтяных углеводородов, моделирование процессов самоочищения прибрежной зоны от органических загрязнителей, проведение оценки экологической чувствительности Севастопольского побережья к нефтяному загрязнению; изучение роли морских организмов в утилизации органических веществ.

Предложенные нами критерии для оценки экологического состояния морской береговой зоны Черного и Азовского морей направлены на оценку состояния отдельных компонентов прибрежных экосистем, предельные значения количественных характеристик которых отвечают удовлетворительному, напряженному, кризисному и катастрофическому экологическому состоянию морской береговой зоны. Эти экологические состояния отвечают соответственно следующим состояниям экосистем: оптимальное, преобладание давления в сторону стресса, стрессовое.

Было проанализировано современное состояние нефтяного загрязнения экосистемы Черного моря с целью оценки его экологического состояния и степени загрязненности нефтяными углеводородами. В результате проведенных исследований установлено, что загрязнение нефтью Черноморской экосистемы во много раз превышает загрязнение Мирового океана, что говорит о катастрофическом экологическом состоянии Черного моря. Общее экологическое состояние Черного моря за последнее десятилетие ухудшилось, несмотря на снижение экономической активности в ряде причерноморских стран.

Нами впервые проведены комплексные экологические исследования в прибрежной зоне акватории Севастопольских бухт и прилегающих к ним участков побережья, характери-

зующихся различным составом грунтов, от илистых до песчаных, с включениями морской гальки и испытывающих волновое воздействие различной интенсивности. В этой зоне происходит концентрация загрязняющих веществ, идущих как с суши, так и со стороны моря, а также усиленный обмен компонентов загрязнения между морской водой и донными наносами [17].

Биогеохимические показатели отражают те свойства, которые приобретает донный осадок под воздействием внешних факторов, в частности, загрязнения бухт нефтепродуктами. Однако основным условием воздействия загрязнения является природа самого донного осадка. При этом учитывается гранулометрический состав, количество в донном осадке тонких минеральных частиц и их минералогический состав (глинистые вторичные минералы, например, имеют высокую аккумулярующую способность, в результате процесс накопления преобладает над процессом преобразования органического вещества).

Установлено, что самыми чистыми на протяжении последних лет остаются донные осадки Учкеевки, бухт Круглая и Казачья, а наиболее загрязненными по количеству хлороформ-экстрагируемых веществ и нефтяных углеводородов являются воды Севастопольской и Южной бухты (рис. 2).

Такая ситуация вызвана прежде всего базированием кораблей, судов, а также наличием объектов судоремонтной промышленности и грузопассажирских причалов.

Поступающие в воду органические вещества служат пищей микроорганизмам, и поэтому обогащение воды этими веществами непременно влечет за собой вспышку развития микрофлоры. Микроорганизмы являются биоиндикаторами наличия различных видов загрязняющих веществ в морской воде. Гетеротрофные бактерии в своем питании используют легкодоступные органические вещества. Количественное содержание нефтеокисляющих микроорганизмов является свидетельством идущего процесса естественного самоочищения морской среды от нефти и нефтепродуктов [14, 15] (рис. 3).

Наибольшая численность гетеротрофных (10^6 - 10^7 кл./г) и нефтеокисляющих (10^3 - 10^4 кл./г) бактерий отмечена на станциях, подверженных сильной антропогенной нагрузке, и расположенных в глубине бухт (бухта Северная, вершина бухты Круглая). Из грунтов данного региона выделены 281 культура гетеро-

трофных бактерий, из которых 100 культур способны использовать углеводороды нефти в качестве единственного источника углерода и энергии (Рис. 4). Наибольшее число среди выделенных нефтеокисляющих культур было отнесено к роду *Pseudomonas* – 54%. На культуры рода *Marinomonas* – приходится 7%,

Azotobacter - 4%, *Erithrobacter* - 5%, *Marinococcus* - 6%, *Mezophilobacter* - 6%, *Altheromonas* - 5%, *Bacillus* - 5%, *Microbacterium* - 4%, *Arthorobacter*, *Micrococcus* и *Vibrio* – около 1 % [15].

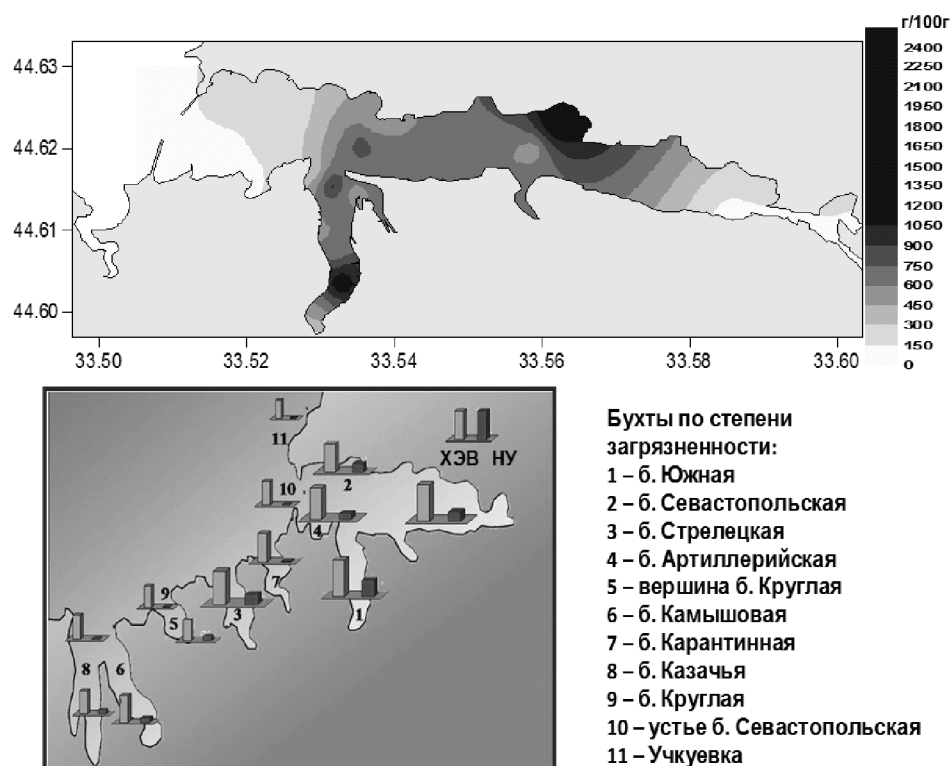


Рис. 2. Распределение хлороформэкстрагируемых веществ нефтяных углеводородов в донных осадках Севастопольских бухт [12, 17]

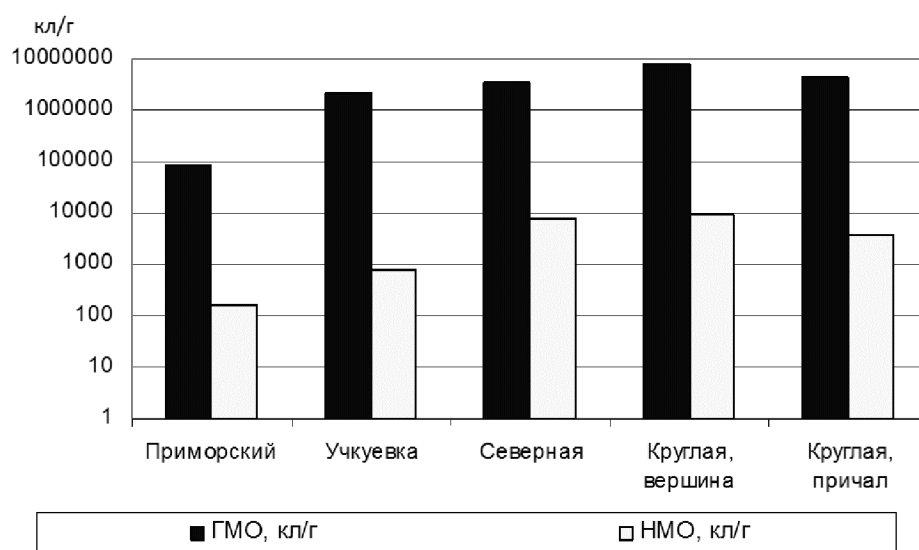


Рис. 3. Численность гетеротрофных (ГМО) и нефтеокисляющих (НМО) бактерий в прибойной зоне Севастопольских бухт [15]

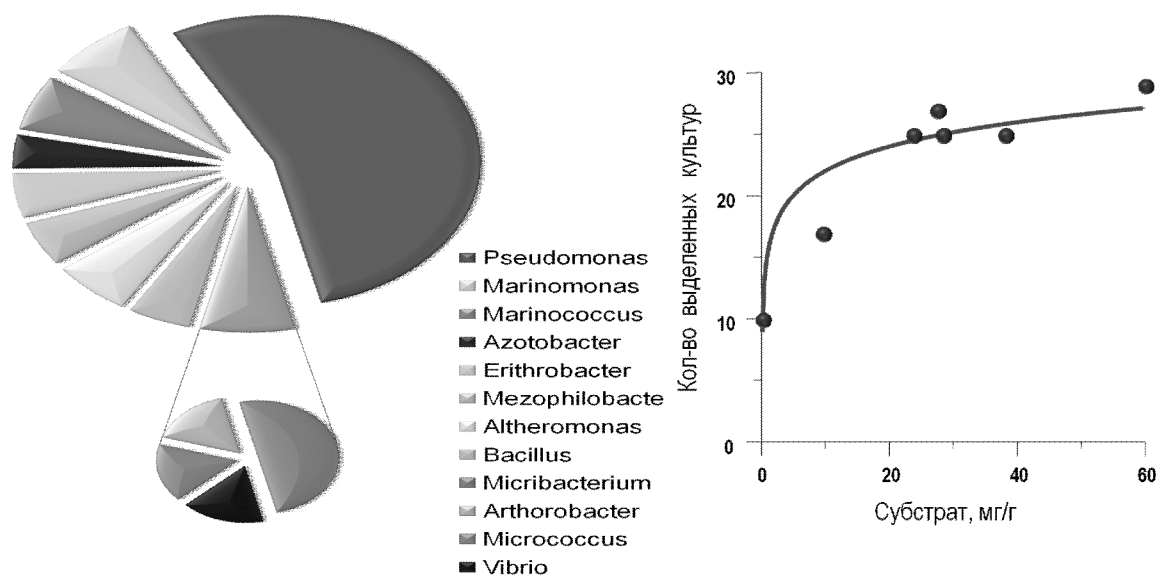


Рис. 4. Родовое разнообразие нефтеокисляющих бактерий в прибойной зоне Севастопольских бухт [15]

Опубликованные данные ряда авторов по скорости микробного разрушения углеводородов нефти в разных морских водоемах имеют широкую вариабельность – от 0,7 до 500 мг/(л*сутки). Скорость микробного разрушения нефтяных углеводородов в донных осадках прибрежной зоны Севастопольского региона, по нашим данным, составляла 0,8 мг/(г*сутки) в летнее время и 0,01 мг/(г*сутки) зимой. По нашим расчетам, для естественного самоочищения морской среды от нефтяных углеводородов в прибойной зоне Севастополя понадобится, в среднем, около 2 лет [15].

Исследовано влияние абиотических факторов на численность нефтеокисляющих бактерий в прибрежных районах Черного моря (акватория Севастопольских бухт). Сделан анализ зависимостей численности нефтеокисляющих бактерий от температуры среды, общего содержания нефтяных углеводородов в морской воде и донных осадках, а также волнового перемешивания [17]. Зависимость между численностью нефтеокисляющих бактерий и температурой среды характеризуется достаточно высокой степенью корреляционной связи ($R=0.951$). Установлен предел увеличения численности бактерий, достигаемый при превышении температуры свыше 30°C . С уменьшением температуры понижается численность нефтеокисляющих бактерий, однако это не приводит к существенному замедлению процессов самоочищения и накоплению нефтяных углеводородов в морской воде и донных осадках.

Нами рассчитана критическая антропогенная нагрузка нефтяного загрязнения прибойной зоны Севастопольского побережья Черного моря, площадью 216 км^2 , которая не должна превышать 700 тонн в год. Данные величины могут значительно колебаться в зависимости от степени загрязнения морской воды и донных осадков нефтепродуктами, самоочищающей способности грунтов, численности нефтеокисляющих микроорганизмов, продукционных характеристик бактерий и др. (рис. 5).



Рис. 5. Факторы самоочищения, определяющие судьбу нефтяных разливов и время самоочищения [17]

Приведенные расчеты свидетельствуют о больших потенциальных возможностях Севастопольского побережья Черного моря к самоочищению от нефтяных углеводородов. Одна-

ко, с увеличением уровня загрязнения, самоочищающая способность среды по отношению к нефтяным углеводородам значительно снижается, что, в конечном итоге, приводит к перестройке всей структуры экосистемы и уменьшению продукционной способности нефтеокисляющих бактерий. Для более точного расчета ассимилирующей способности морских экосистем по отношению к углеводородам нефти необходимы комплексные исследования, в том числе систематические микробиологические наблюдения в различных районах Черного моря, что позволит прогнозировать возможные последствия влияния нефти на морские экосистемы [16].

Севастопольская бухта рассматривается как полигон для изучения взаимодействия морских организмов с загрязнением и отработки вариантов систем гидробиологической очистки морских вод и оздоровления прибрежных акваторий. Один из путей улучшения экологического состояния акваторий и стимулирования процессов естественного самоочищения основан на создании искусственных гидробиологических систем для очистки загрязненных морских вод и оздоровления прибрежных акваторий.

Мидии размером 50 – 100 мм фильтруют от 40 до 140 л в сутки, обладают высокой устойчивостью ко всякого рода загрязнению, в том числе и нефтяному. Они могут выживать определенное время при превышении ПДК нефти в морской воде в десятки и сотни раз. Эти свойства моллюсков используются в качестве первого звена системы гидробиологической очистки по удалению из морской воды загрязнения, которые уже попали в акваторию [12].

Были разработаны, сконструированы и установлены на Черном море в районах Новороссийска, Севастополя и Созополя (Болгария) различные варианты систем гидробиологической санации морских акваторий. С целью локализации распространения загрязняющих веществ ливневых стоков и их очистки в бухте Артиллерийская (Севастополь) в 1995 г. была смонтирована гидробиологическая система. Для снижения затрат система монтировалась на сваях существующего причала. В 1993 году введена в строй 2-ая очередь системы гидробиологической очистки в нефтегавани, сконструированная на основе секций сетевого заграждения (разновидность минно-торпедного оружия) [12, 17]. В настоящее время процессы самоочищения акватории нефтегавани обеспечиваются в значительной степени за счет перифитонных сообществ искусственных гидробиологических сооружений различных модификаций.

Для оценки функционального состояния планктонного сообщества за более чем 40-летний период проведена оценка амплитудных параметров биолуминесценции при наблюдениях в 1965-1966 [18] и 2007-2009 годах (рис. 6). Поскольку все измерения поля биолуминесценции в середине 60-х годов прошлого столетия выполнялись исключительно в ночное время, а нынешние проводились большей частью в светлое время суток, для интерполяции дневных измерений к ночным использовали вычисленные коэффициенты суточной динамики интенсивности поля биолуминесценции.

В результате зарегистрировано смещение в последние годы осеннего и весеннего максимумов биолуминесценции с октября на ноябрь и с мая-июня на апрель-май, соответственно. Проведенный анализ показал, что наиболее вероятной причиной этого является изменение климата (глобальное потепление). Действительно, средняя температура в слое 0-50 м осенью 2007-2008 была больше на 1.0⁰С и весной на 0.8⁰С аналогичных показателей в 1965-1966 (рис.7). [19]

Вместе с тем, несмотря на антропогенный пресс в 70-80-х годах прошлого столетия, биологическое загрязнение (в частности, вселение гребневика *Mnemiopsis leidyi*), глобальное потепление и т.д. – устойчивость планктонного сообщества Черного моря оказалась достаточной для их преодоления. Действительно, оцененное по параметрам биолуминесценции функциональное состояние планктонного сообщества Черного моря в настоящее время практически идентично его функциональному состоянию в середине 60-х годов прошлого столетия (рис. 6). [19]

Нами была сделана попытка экономической оценки экологического состояния прибрежных экосистем Крымского региона [17]. Экологическую ситуацию в Крыму характеризуют как напряженную из-за смены различных компонентов природной среды. Для Крымского региона это: внесение загрязнений и опреснение морских акваторий реками, эрозия почв, загрязнение сточными водами и нефтепродуктами, нарушения при добыче полезных ископаемых, засоление земель, антропогенно-рекреационное переустройство ландшафта, загрязнение прибрежной зоны моря, ухудшение качества гидроминеральных ресурсов, усиливающееся воздействие автотранспорта на атмосферу городов Крыма. Данный перечень можно продолжить. Все это создает чрезвычайную техногенную нагрузку на узкую береговую линию региона, что еще раз подтверждает необ-

ходимость совместной деятельности и координации усилий на сохранение Крымского Причерноморья. При сочетании функционирования туристско-рекреационного сектора с морехо-

зяйственным и индустриальным комплексами, по-видимому, возможно их совместное развитие в сочетании с природоохранной и экологической деятельностью.

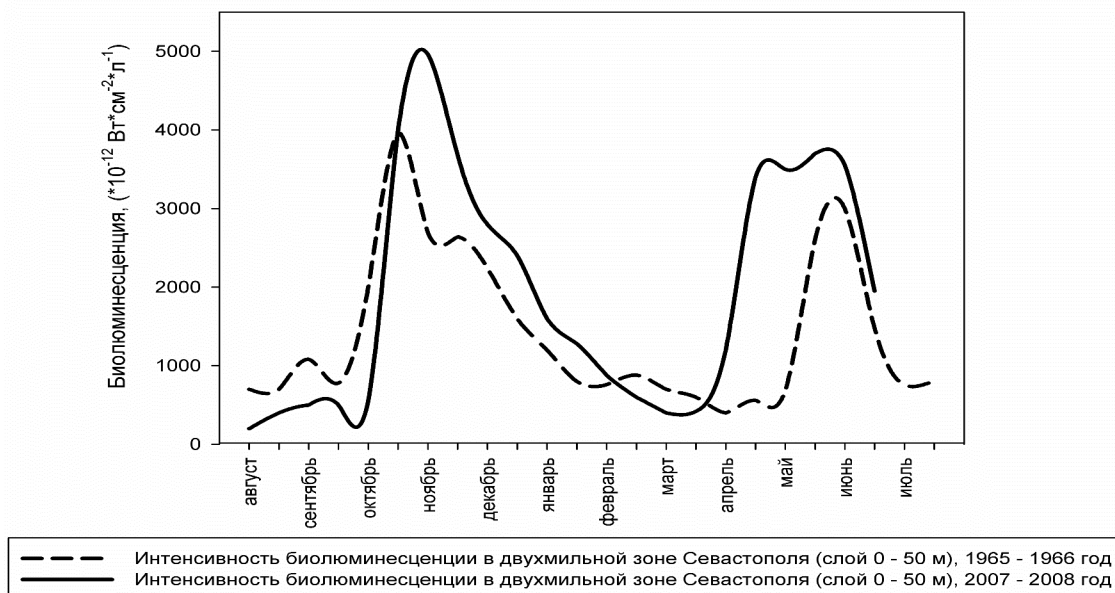


Рис. 6. Интенсивность биолюминесценции при мониторингах в 1965-1966 и 2007-2008 годах [19]

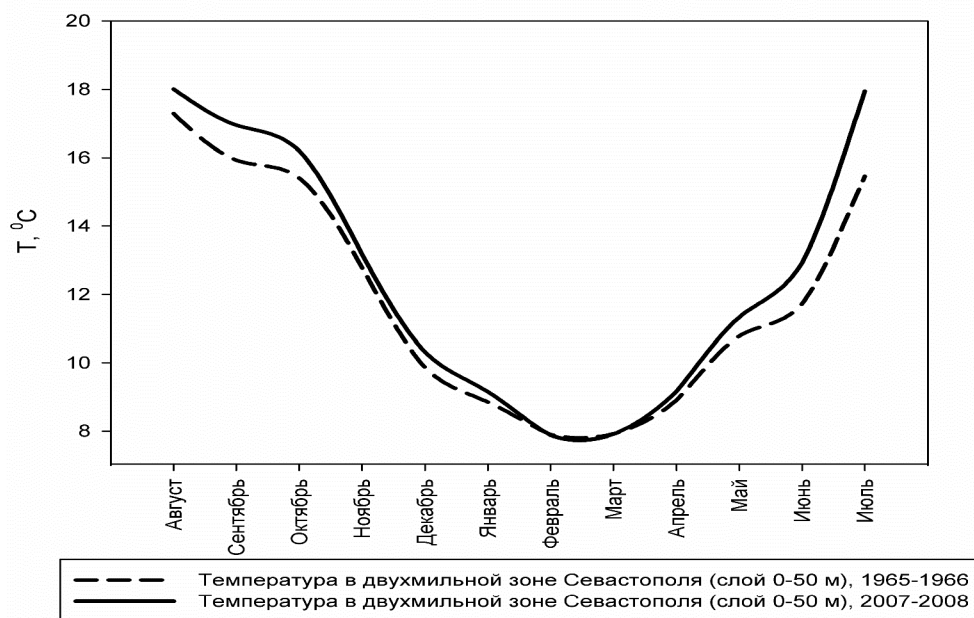


Рис. 7. Изменения температуры при мониторингах в 1965-1966 и 2007-2008 годах [19]

Таким образом, создание общей программы, способствующей экологически безопасной эксплуатации рекреационной зоны прибрежных акваторий Черного моря – шаг к достижению устойчивого развития Черноморского региона. Внедрение в систему прибрежного ме-

неджмента экологического мониторинга обеспечит объективную оценку состояния окружающей среды, самоочищающей способности прибрежных акваторий, позволит разработать конкретные практические рекомендации для управления качеством водной среды и эксплуа-

тации прибрежных акваторий, развития рекреации и туризма в Крымском Причерноморье. Внедрение в широкую практику альтернативных экологически чистых источников энергии в приморских территориях несомненно уменьшит антропогенную нагрузку на морские экосистемы бухт и будет способствовать улучшению экологической ситуации в зонах рекреации и туризма.

Заключение

Проанализированы известные критерии оценки экологического состояния прибрежных экосистем по основным химическим и биологическим показателям. На основе многолетних данных рассмотрено экологическое состояние Севастопольских бухт, изучено взаимодействие морских организмов и их сообществ с загрязнением, сделаны предложения по улучшению экологического состояния акваторий. Предложен новый подход к экологической оценке в системе интегрированного управления ресурсно-экологической безопасности прибрежной зоны, что позволит разработать практические рекомендации для управления качеством водной среды и эксплуатации прибрежных акваторий, а также для развития рекреации и туризма в Крымском регионе.

Динамика параметров поля биолюминесценции *in situ* может быть использована при оперативной оценке функционирования водных экосистем.

Один из путей улучшения экологического состояния акваторий и стимулирования процессов естественного самоочищения основан на создании искусственных гидробиологических систем для очистки загрязненных морских вод и оздоровления прибрежных акваторий. Участие биоты в процессе самоочищения позволяет целенаправленно использовать морские организмы в биомониторинге и в борьбе с загрязнением, а также для разработки гидробиологических систем очистки загрязненных морских вод.

Проанализированы тенденции и закономерности ресурсно-экологических и экономических трансформаций в бассейне Черного и Азовского морей в контексте оценки перспектив устойчивого развития и обеспечения безопасности приморских регионов Крыма. Отмечено, что постоянный рост антропогенных нагрузок на экосистемы исследуемых морей приводит к необратимым процессам истощения и ухудшения качества естественно ресурсного потенциала, к более частому и масштабному

проявлению кризисных ситуаций в Черном море. Предложен комплексный подход к решению проблем использования прибрежных зон Черного моря, намечены пути к развитию приоритетных направлений прибрежного менеджмента в Крыму.

Благодарности. Авторы выражают благодарность и признательность д.б.н., профессору Олегу Глебовичу Миронову и д.б.н., профессору Юрию Николаевичу Токареву за ценные научные советы и замечания, консультации при разработке новых гипотез и требовательность к их апробации.

Список литературы

1. Израэль Ю.А. Антропогенная экология океана / Ю.А. Израэль, А.В. Цыбань // Л.: Гидрометеиздат, 1989, 528 с.
2. Методические основы комплексного экологического мониторинга океана, М., Гидрометеиздат, 1988, стр.287.
3. Ежегодник качества морских вод по гидрохимическим показателям за 1991 год. - Обнинск, ВНИИГМИ-МЦД, 1992, 186 с.
4. Методические указания по формализованной комплексной оценке качества поверхностных и морских вод по гидрохимическим показателям, М.: 1988.
5. Рубцова С.И. Разработка научных основ интегрированного управления прибрежной зоной Крыма / С.И. Рубцова, А.Г. Лямин, Н.В. Лямина и др. // Системы контроля окружающей среды – 2016. – Вып.4(24), С.135 -142.
6. Токарев Ю.Н. Основы биофизической экологии гидробионтов / Юрий Николаевич Токарев // Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. – 342 с.
7. Лямина Н.В. Динамика параметров поля биолюминесценции в Чёрном море и их сопряжённость с факторами среды : дис. ... канд. биол. наук. – Севастополь, 2014. – 133 с.
8. Eckert R. The subcellular origin of bioluminescence in *Noctiluca miliaris* / R. Eckert, G.T. Reynolds // J. Gen. Physiol. 1967. – 50, № 5 - P. 14, 29 – 1458.
9. Рибаров С. Гемолитическое действие свинца в опытах *in vitro* / С. Рибаров, Л. Беков, И. Бенчев // Фармакология и токсикология. – 1980. – 43, №5. – С. 620 – 622.
10. Узёб Л. Ингибиторы ферментов и метаболизма / Л. Узёб // М.: Мир, 1966. – 350 с.
11. Цыбань А.В. Изучение загрязнения морской среды путем определения мутагенной активности донных отложений / А.В. Цыбань, Т.А. Лычева, Е.Е. Мирская // Экспериментальная онкология, 1987, т.9, N 5, с.27-30.
12. Санитарно-биологические исследования в прибрежной акватории региона Севастополя / Под общей ред. О.Г.Миронова: ИнБЮМ НАН Ук-

- раины. – Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2009. – 102 с.
13. Рубцова С.И. Гидробиологические проблемы прибрежного менеджмента в использовании водных ресурсов юго-западной части Крымского Причерноморья / Светлана Ивановна Рубцова // Современное состояние водных биоресурсов и экосистем морских и пресных вод: проблемы и пути решения: Материалы межд. Науч. Конф., посвященной 100-летию со дня рождения Г.В. Никольского, 20-23 сентября 2010 г. – Ростов-на-Дону: ФГУП “АзНИИРХ”, 2010. – с. 255 – 257.
 14. Миронов О.Г. Микробиологическая индикация нефтяного загрязнения в морской среде / Олег Глебович Миронов // Методы исследования органического вещества в океане. - М.: Наука. - 1980. - С. 275 - 283.
 15. Рубцова С.И. Нефтеокисляющие бактерии как агенты самоочищения морской среды от углеводородов нефти / Светлана Ивановна Рубцова // Вестн. СевНТУ. Механика. Энергетика. Экология. – 2003. – Вып. 48. – С. 165-172.
 16. Рубцова С.И. Влияние абиотических факторов на численность нефтеокисляющих бактерий в прибрежных районах Черного моря / С.И. Рубцова, В.Н.Егоров // Экология моря. – 2004. – Вып. 66. – С. 91-99.
 17. Рубцова С.И. Экологические аспекты интегрированного управления прибрежной зоной Крыма / Светлана Ивановна Рубцова // Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2013. - 200 с.
 18. Битюков Э.П. Годовые изменения интенсивности биолюминесцентного поля в неритической зоне Чёрного моря / Э.П. Битюков, В.П. Рыбасов, В.Г. Шайда // Океанология – 7. №6 – 1967. – С. 1089 – 1099.
 19. Бурмистрова, (Лямина) Н.В. Современные технологии оценки экологического состояния прибрежных акваторий: опыт применения и перспективы / Наталья Викторовна Бурмистрова (Лямина) // Рибне господарство України. – 2-3 (61-62). – 2009. – С. 37 – 39.
 6. Tokarev Yu.N. Biophysical ecology basics of hydrobiotics – Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2006. – 342 p
 7. Lyamina N. V. Dynamics of the bioluminescence field parameters in the Black Sea and their correlation with environment factors: Ph.D. thesis in Biological Science: spec. 03.02.10 "Hydrobiology" / Natalia Viktorovna Lyamina. - Sevastopol, 2014. - 133 p.
 8. Eckert R., Reynolds G.T. The subcellular origin of bioluminescence in *Noctiluca miliaris* // J. Gen. Physiol. 1967. – 50, № 5 - P. 14, 29 – 1458.
 9. Ribarov S., Bekov L., Benchev I. Hemolytic action of lead in *in vitro* experiments/ *Pharmacology and toxicology* – 1980. – 43(5). – P. 620 – 622.
 10. L. Webb Enzyme and metabolic inhibitors. – M.: Mir, 1966. - 350 p.
 11. Tsyban A.V., Lycheva T.A., Mirskaya E.E. Research of marine pollution via testing of mutagenic activity of bottom deposits. *Experimental oncology*, 1987, T.9, (5), P. 27-30.
 12. Sanitary and biological exploration of Sevastopol region waters / Pod obschey red. O.G. Mironova InBYuM NAN Ukrainyi. – Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2009. – 102 p.
 13. Rubtsova S.I. Hydrobiological issues of coastal management of water resources in south west part of Crimean Black Sea region // Modern state of aquatic bioresources and ecosystems of sea and fresh waters: challenges and solutions: Materialy mezhd. Nauch. Konf., posvyaschennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya G.V. Nikolskogo, 20-23 September 2010. – Rostov-na-Donu: FGUP “AzNIIRH”, 2010. – P. 255 – 257.
 14. Mironov O.G. Microbiological indication of oil pollution in marine environment // *Ocean organic matter research methods*. - M.: Nauka. - 1980. - P. 275 - 283.
 15. Rubtsova S.I. Oil-degrading bacteria as self marine purification agents for oil hydrocarbons // *Vestn. SevNTU. Mekhanika. Energetika. Ekologiya*. - 2003. - Vyp. 48. – P. 165-172.
 16. Rubtsova S.I., Egorov V.N. Abiotic impact on oil degrading bacteria population in coastal areas of the Black Sea // *Marine ecology*. – 2004. – V. 66. – P. 91-99.
 17. Rubtsova S.I. Ecological aspects of integrated monitoring of Crimean coastal area – Sevastopol: EKOSI-Gidrofizika, 2013. - 200 p.
 18. Bityukov E.P., Rybasov V.P., Shayda V.G. Annual changes in bioluminescent field intensity in neritic zone of the Black Sea // *Oceanology* – 7(6) – 1967. – P. 1089 – 1099.
 19. Burmistrova (Lyamina) N.V. Modern technologies in environmental condition assessment for coastal waters: case history and prospects / Natalya Viktorovna Burmistrova (Lyamina) // *Ribne gospodarstvo UkraYini*. – 2-3 (61-62). – 2009. – P. 37 – 39.

References

1. Izrael Yu.A., Tsyban A.V. Antropogenic ocean ecology. L: Gydrometeoizdat, 1989, 528 p.
2. Methodology of complex ecological monitoring of oceans. M., Gydrometeoizdat, 1988, 287 p.
3. Annual analysis of sea water quality using 1991 hydrochemical data.- Obninsk, VNIIGMI-MTsD, 1992, 186 pages.
4. Methodological guidelines for explicit integrated assessment of quality of surface and sea waters using hydrochemical data. M.: 1988.
5. Rubtsova S.I., Lyamin A.G., Lyamina N.V. et al. Development of scientific basis for integrated monitoring of Crimean coastal area. *Environmental monitoring systems* – 2016. – 4(24), P.135 -142..

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

УДК.621.039.7

Некоторые аспекты обращения с металлическими РАО на АЭС Российской Федерации

Т.Н. Замыслова¹, Е.В. Андреева², А.С. Мирошниченко³, С.С. Петров⁴,
Н.А. Мороз⁵

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных станций»,
ул. Ферганская, 25, г. Москва, 109507, Россия,
¹zamytanya@yandex.ru, ²a_lena60@mail.ru, ³m_a_s@bk.ru, ⁴petrov@vniiaes.ru, ⁵sv_nata@mail.ru

Статья поступила 07.09.2016 г.; после доработки 12.09.2016 г.

Аннотация

В настоящее время в Российской Федерации особую актуальность и значимость приобрела проблема безопасности при обращении с радиоактивными, в том числе металлическими, отходами. В статье приводится анализ существующей законодательной, нормативной правовой базы Российской Федерации по обращению с РАО, описываются некоторые особенности существующей системы обращения с металлическими РАО на АЭС РФ. Приводятся данные о степени заполнения хранилищ радиоактивных отходов, количестве накопленных твердых РАО, включая металлические РАО, а также прогнозные оценки по количеству металлических РАО, образующихся при выводе из эксплуатации энергоблоков различных типов. Отмечено, что ни на одной АЭС нет полного комплекса по переработке МРАО. Вместе с тем, создание универсальной технологии кондиционирования металлических РАО позволит в конечном итоге минимизировать издержки по хранению металлических РАО, обеспечить надежность и безопасность их хранения.

Ключевые слова: металлические радиоактивные отходы, законодательная, нормативная база по обращению с РАО, хранилища РАО, технологии кондиционирования МРАО.

Some aspects of the treatment of metal radioactive waste at NPP of the Russian Federation

T.N. Zamislova¹, E.V. Andreyeva², A.S. Miroshnichenko³, S.S. Petrov⁴, N.A. Moroz⁵

JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation»,
25 Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia,
¹zamytanya@yandex.ru, ²a_lena60@mail.ru, ³m_a_s@bk.ru, ⁴petrov@vniiaes.ru, ⁵sv_nata@mail.ru

Received 07.09.2016 y.; received in final form 12.09.2016 г.

Abstract

Safety problems that occur during radioactive (particularly metal) waste handling are of current actuality and importance in Russian Federation. In the article the analysis of present laws and regulatory environment for handling with RW in Russian Federation is given; some peculiarities of metal RW management in nuclear power plant in Russia are described. The information about the level of radioactive waste reservoirs filling, the quantity of cumulated solid RW, including metal RW is given. The prediction of metal RW quantity accumulation, appearing during exploitation withdrawal of different type's power generating units is done. It has been noted that there are no complexes of metal RW recycling in all

nuclear power plants. Besides, developing of universal technology of metal RW conditioning allows finally minimizing costs on the metal RW storage and providing reliability and safety of its keeping.

Keywords: metal radioactive waste, laws and regulatory environment for handling with RW, technology of metal RW conditioning.

Введение

В Российской Федерации находятся в эксплуатации 35 энергоблоков на 10 атомных станциях, в том числе, 18 энергоблоков с водяными реакторами, 15 энергоблоков с канальными кипящими реакторами и два энергоблока с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем, один из которых находится на этапе опытно-промышленной эксплуатации.

Металлические радиоактивные отходы образуются как в ходе ремонтных работ при штатной эксплуатации энергоблоков, так при выводе энергоблоков из эксплуатации.

Проблема безопасности при обращении с радиоактивными отходами в Российской Федерации приобрела в настоящее время особую актуальность и значимость, что обусловлено следующими обстоятельствами [1]:

- большим количеством накопленных и образующихся отходов, что вызывает серьезное беспокойство населения и государственных органов в связи с потенциальной радиационной опасностью хранилищ и могильников РАО для человека и окружающей среды;
- необходимостью совершенствования существующей практики обращения с РАО для приведения ее в соответствие с современными экологическими требованиями;
- активным и все возрастающим влиянием общественности на все вопросы, связанные с деятельностью предприятий атомного профиля.

На начальных стадиях развития ядерных технологий обращение с металлическими РАО не рассматривалось как комплексная проблема. В результате такого подхода и принятия достаточно упрощенных решений по обращению с РАО образовались различные объекты радиоактивного наследия, такие как поверхностные пункты захоронения РАО с различным периодом потенциальной опасности (от десятков до сотни лет).

Вопросы обращения с РАО, в том числе и обращения с металлическими РАО, не нашли своего комплексного решения из-за существовавшей в течение длительного времени практики отложенных решений. Обращение с данным

видом отходов сводилось к частичной переработке эксплуатационных среднеактивных и высокоактивных металлических РАО с целью сокращения их объема и хранению в хранилищах «навалного» типа или под водой, с условием последующей их переработки (кондиционирования) и переходом на организованное хранение.

Прямые следствия политики «отложенных решений» в сфере ядерной и радиационной безопасности негативно сказываются на состоянии окружающей среды, здоровье населения и общественном восприятии ядерных технологий. От решения проблемы РАО во многом зависят возможные масштабы и динамика развития ядерной энергетики и радиационных технологий [2].

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – охарактеризовать существующую в настоящее время систему обращения с металлическими РАО на АЭС Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели необходимо: 1) провести анализ существующей законодательной, нормативной правовой базы Российской Федерации по обращению с металлическими РАО; 2) рассмотреть особенности существующей системы обращения с металлическими РАО на АЭС РФ.

Анализ существующей законодательной, нормативной правовой базы Российской Федерации по обращению с металлическими РАО

Основным гарантом обеспечения безопасности при использовании атомной энергии и обращении с радиоактивными отходами является государство. Для адекватного выполнения такой роли государство должно создать и обеспечить нормальное функционирование национальной системы обращения с радиоактивными отходами. Основной целью, которая должна быть достигнута при обращении с радиоактивными отходами, в том числе металлическими, является охрана здоровья человека и обеспече-

ние безопасности для окружающей среды, как в настоящее время, так и для будущих поколений.

В своей деятельности по обращению с РАО Российская Федерация руководствуется международными договорами, участницей которых она является, в частности, Объединенной конвенцией «О безопасности обращения с радиоактивными отходами и о безопасности обращения с отработавшим топливом», подписанной в МАГАТЭ в 1999 г. и ратифицированной Советом Федерации в 2005 г. [3].

Конвенция определяет общие требования безопасности обращения с радиоактивными отходами, включающими в себя меры защиты отдельных лиц, общества в целом и окружающей среды от радиологических и других рисков, в частности:

- минимизацию практически достижимого уровня образования РАО;
- взаимозависимость различных стадий обращения с РАО;
- законодательно утвержденные на национальном уровне соответствующие методы защиты отдельных лиц, общества в целом и окружающей среды, учитывающие международные критерии и нормы;
- учет биологических, химических и других рисков, которые могут быть связаны с обращением с РАО;
- стремление не возлагать чрезмерное бремя на будущие поколения.

Рекомендации и нормативные документы международных организаций и зарубежных государств могут быть использованы в Российской Федерации только после их существенной модификации в соответствии с российским законодательством и накопленным практическим опытом обращения с РАО.

В настоящее время в Российской Федерации обращение с РАО регулируется рядом действующих законов и постановлений.

Основным документом, которым была установлена законодательная база и принципы регулирования отношений, возникающих при использовании атомной энергии, является Федеральный Закон № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» [4].

Этим законом дано нормативное определение РАО и установлен ряд принципиальных положений правового режима обращения с ними. Кроме того, Закон регламентирует деятельность, направленную на защиту окружающей среды, здоровья и жизни людей.

В главе X настоящего Закона сформулированы основные принципы Государственной политики в области обращения с ядерными материалами, радиоактивными веществами и радиоактивными отходами, которая должна предусматривать комплексное решение проблем нормирования их получения, образования, использования, физической защиты, сбора, регистрации и учета, транспортирования, хранения и захоронения.

Федеральный закон № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [5] определяет классификацию радиоактивных отходов, признаки классификации удаляемых радиоактивных отходов для целей их захоронения, а также определяет требования федеральных норм и правил, регулирующих обращение с РАО. Закон также устанавливает требования к обеспечению безопасности при обращении с радиоактивными отходами, требования к их захоронению, определяет необходимость приведения РАО в соответствие с критериями приемлемости и дальнейшее их захоронение или хранение Национальным оператором до ввода в эксплуатацию соответствующих пунктов захоронения, а также порядок определения соответствия РАО, принимаемых для захоронения, критериям приемлемости.

В соответствии с [6] удаляемые радиоактивные отходы для целей их захоронения классифицируются по следующим признакам:

- 1) в зависимости от периода полураспада содержащихся в радиоактивных отходах радионуклидов:
 - долгоживущие радиоактивные отходы;
 - короткоживущие радиоактивные отходы.
- 2) в зависимости от удельной активности:
 - высокоактивные радиоактивные отходы (ВАО);
 - среднеактивные радиоактивные отходы (САО);
 - низкоактивные радиоактивные отходы (НАО);
 - очень низкоактивные радиоактивные отходы (ОНАО).
- 3) в зависимости от агрегатного состояния:
 - жидкие радиоактивные отходы;
 - твердые радиоактивные отходы;
 - газообразные радиоактивные отходы.

Министерством здравоохранения Российской Федерации также установлен ряд документов, регламентирующих обращение с РАО [7-9].

В соответствии с Санитарными правилами и нормативами [7] к радиоактивным отходам относятся любые отходы, в которых удельная активность радиоактивных изотопов превышает значения их минимально значимой удельной активности, величина которой для каждого присутствующего в РАО радионуклида приведена в приложении к [7].

Детальный порядок обращения с РАО регламентируется Санитарными правилами обращения с радиоактивными отходами в СПОРО-2002. СП 2.6.6.1168-02 [8].

Согласно [8], к твердым радиоактивным отходам (ТРО) относятся не предназначенные для дальнейшего использования вещества в твердом агрегатном состоянии, материалы, изделия, оборудование, объекты биологического происхождения, радионуклидные источники, загрязненные объекты внешней среды, грунт, отвержденные жидкие радиоактивные отходы, в которых удельная активность радионуклидов превышает установленные нормами радиационной безопасности значения минимально значимой удельной активности, приведенной в приложении к [7]. При неизвестном радионуклидном составе величина удельной активности для источников бета-излучения более 100 кБк/кг, для источников альфа-излучения 10 кБк/кг, для трансурановых радионуклидов 1 кБк/кг.

Кроме того, в правилах определены основные принципы радиационной безопасности и стадии обращения с РАО, а также указаны требования к сбору, хранению и удалению радиоактивных отходов из организации.

Санитарные правила [8] также определяют требования к переработке твердых РАО. В частности, указано, что методы переработки ТРО включают следующие технологические операции:

- уменьшение объема отходов за счет фрагментации, сжигания, прессования, дезактивации и переплавки металла и др.;
- упаковку фрагментированных и переработанных отходов;
- заключение сыпучих отходов в матрицу;
- частичный возврат очищенных до санитарных норм веществ и материалов для повторного использования в промышленности.

При этом фрагментации подлежат крупногабаритные, длинномерные изделия – РАО, переработка, упаковка или транспортировка кото-

рых затруднена. Металлические твердые РАО низкого и среднего уровня активности с поверхностным загрязнением подлежат дезактивации. Метод дезактивации определяется характером и уровнем загрязнения. Образующиеся растворы и шламы подлежат отверждению и упаковке. Переплавке подлежат металлические твердые РАО после дезактивации и фрагментации.

К повторному использованию после переплавки допускается металл с удельной активностью, не превышающей величин, указанных в Основных санитарных правилах обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99/2010) [8].

При эксплуатации АЭС образуются радиоактивные отходы различных категорий и агрегатных состояний. Характеристики и количество отходов зависят от типа реактора, особенностей проекта, эксплуатационных регламентов и эксплуатационной деятельности, в том числе, обслуживания, перегрузки топлива и эксплуатационных событий, истории эксплуатации станции, степени выгорания топлива.

При выводе АЭС из эксплуатации количество РАО значительно возрастет и самым серьезным образом отражается на общей ситуации с отходами. В этом случае среди ТРО, как правило, выделяют три группы отходов, характеризующихся большими объемами, различной активностью или рядом специфических свойств:

- металлические отходы;
- отходы строительных материалов;
- отходы, возникающие при демонтаже, связанном с разрушением защитных барьеров.

Требования к обеспечению безопасности при сборе, переработке, хранении и кондиционировании ТРО на ядерных установках, радиационных источниках, в пунктах хранения ядерных материалов и радиоактивных веществ устанавливаются Федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии НП-020-15 [9].

Согласно Нормам, сбор ТРО должен осуществляться с учетом следующих факторов:

- вида излучения и периода полураспада радионуклидов;
- удельной и суммарной активности;
- содержания ядерно-опасных делящихся нуклидов;
- природы ТРО (органические и неорганические);
- морфологического состава;

- способов переработки, кондиционирования, транспортирования и хранения.

Предусматривается переработка ТРО методом сжигания, пиролиза, прессования, измельчения (фрагментации), переплавки (для металлических ТРО) или иным способом, установленным и обоснованным в проектной документации. При этом переработка должна обеспечивать соответствие показателей качества подлежащих захоронению продуктов переработки ТРО критериям приемлемости РАО для захоронения.

Особенности существующей системы обращения с металлическими РАО на АЭС РФ

В России широкомасштабная реализация комплекса мер по развитию систем обращения с РАО и ОЯТ, выводу из эксплуатации ядерно- и радиационно-опасных объектов, и ликвидации проблем «ядерного наследия» началась после ратификации «Объединенной конвенции по безопасному обращению с ОЯТ и по безопасному обращению с РАО» (ноябрь 2005 г.) и с принятием в 2007 г. ФЦП «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2008 год и на период до 2015 года» (ФЦП ЯРБ). Впервые за более чем 60-летнюю историю атомной отрасли на реализацию ФЦП ЯРБ, предусматривающей создание объектов инфраструктуры по обращению с РАО, создание мощностей по переработке, хранению и транспортированию РАО, а также обеспечение безопасности при обращении с ранее накопленными ОЯТ и РАО, было выделено финансирование за счет средств федерального бюджета в размере 131,82 млрд. руб.

ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации», регулирующий отношения в области обращения с РАО, является основой создаваемой в настоящее время единой государственной системы обращения с РАО. Основными принципами и требованиями ЕГС РАО являются:

- принцип четкого разграничения ответственности за РАО (наследие и вновь образующиеся эксплуатационные отходы предприятий и организаций);
- требование обязательного окончательного захоронения РАО;

- принцип ответственности организаций – производителей РАО независимо от ведомственной принадлежности и форм собственности за безопасное обращение с ними на всех стадиях технологического цикла, вплоть до передачи уполномоченной организации для окончательного захоронения;
- принцип «загрязнитель платит за все».

В настоящее время металлические РАО, накопленные в результате деятельности атомных станций в РФ, в целях предотвращения распространения радионуклидов в окружающую среду хранятся на территориях самих станций в хранилищах твердых радиоактивных отходов [10]. Как правило, это сооружения, внутри которых МРАО хранятся навалым способом. Стены сооружений выполнены из железобетонных конструкций, являющихся барьерами для обеспечения безопасности населения и окружающей среды, что минимизирует распространение радионуклидов за пределы хранилища.

Старение хранилищ интенсифицирует их уязвимость под действием как природных, так и техногенных факторов, в связи с чем объекты временного хранения РАО в силу различных обстоятельств могут представлять потенциальную угрозу окружающей среде.

Кроме того, согласно оценкам Ростехнадзора степень заполнения ХТО на АЭС к концу 2015 г. в среднем составляла 57,4 %. Однако ХТО Нововоронежской, Ленинградской и Курской АЭС заполнены на 95,8 %, 79,3 % и 77,6 % соответственно [11].

В соответствии с первоначальными проектами АЭС обращение с радиоактивными отходами, в том числе и металлическими, на атомных станциях ОАО «Концерн Росэнергоатом» сводилась к частичной переработке эксплуатационных РАО с целью сокращения их объема и последующему хранению в хранилищах РАО на площадках АЭС в течение всего срока эксплуатации энергоблоков. В результате этого на АЭС накопилось значительное количество некондиционированных и непереработанных РАО.

В состав находящихся в хранилищах отходов входит, в том числе, значимая часть высокоактивных отходов. В соответствии с принятой технологией обращения такие отходы должны собираться в отдельных секциях хранилищ. В процессе многолетнего обращения с ВАО технологии сортировки по активности не всегда соблюдались, и в отсеки ВАО могли попадать РАО средней и низкой активности.

Практически все радиоактивные отходы, которые в настоящее время находятся во временных пунктах хранения АЭС, являются накопленными отходами. В соответствии с № 190-ФЗ ответственность за накопленные РАО взяло на себя государство, что, с другой стороны, не снимает ответственность за безопасность этих отходов с эксплуатирующей организации ОАО «Концерн Росэнергоатом».

По состоянию на 1.01.2015 г. количество накопленных ТРО, включая металлические РАО, составило 181012 м³, из которых 170349 м³ находится в федеральной собственности и 10663 м³ являются собственностью ОАО «Концерн Росэнергоатом» [12].

Одной из задач Стратегии обращения с радиоактивными отходами ОАО «Концерн Росэнергоатом», введенной в действие 19.03.2014 г., является разработка и реализация мероприятий по снижению к 2020 г. объемов образования РАО не менее, чем на 5 % [12]. Однако технологических решений для системной минимизации количества образующихся РАО пока нет.

Назначенный проектом срок службы большинства энергоблоков АЭС близок к окончанию [13]. После вывода таких объектов из эксплуатации образуется значительное количество металлических ТРО. По некоторым оценкам, при выводе из эксплуатации одного энергоблока с реактором типа ВВЭР-440 образуется до 500 т, с реактором типа ВВЭР-1000 – до 900 т, с реактором типа РБМК-1000 – до 2500 т металлических РАО [14].

При этом ни на одной АЭС нет полного комплекса по переработке МТРО. Более того, в отрасли отсутствуют типовые решения переработки и подготовки МТРО к захоронению. Технологии переработки и кондиционирования РАО, а, соответственно, и установки переработки, создавались с учетом специфики образующихся РАО на каждом предприятии и в большинстве своем не являются унифицированными и универсальными.

Единственным в РФ специализированным предприятием, которое в промышленном масштабе занимается переработкой МРАО, является ЗАО «ЭКОМЕТ-С», г. Сосновый Бор, Ленинградская обл. [15]. Технология переработки и утилизации МРАО включает в себя в качестве основных стадий радиационный контроль, сортировку, фрагментацию, дезактивацию и переплавку. Однако, данная технология предназначена только для переработки очень низкоактивных и низкоактивных МРАО.

Таким образом, к основным недостаткам в

области обращения металлическими РАО можно отнести следующие:

- большая часть накопленных и вновь образующихся отходов не перерабатывается;
- многие инженерные сооружения не обеспечивают безопасное хранение переработанных отходов;
- старение временных хранилищ интенсифицирует их уязвимость под действием как природных, так и техногенных факторов;
- значительные финансовые и материальные затраты на эксплуатацию временных хранилищ;
- отсутствие эффективной системы учета и контроля за образованием и хранением отходов;
- отсутствие систематизированного и полного пакета нормативно-технических документов, регламентирующих единый порядок безопасного обращения с МТРО на всех стадиях переработки и утилизации.

Заключение

Комплекс описанных проблем в сфере обращения с металлическими РАО обуславливает актуальность и важность работ по созданию универсальной технологии кондиционирования металлических РАО, основными этапами которой должны являться извлечение МРАО из хранилищ «навалного» типа, уменьшение объема (уплотнение) МРАО различными способами и помещение их в контейнеры для длительного хранения.

Для обеспечения нормальной эксплуатации АЭС требуется принятие мер по переработке хранящихся высоко- и среднеактивных металлических отходов и созданию новых объектов хранения. В соответствии с действующими нормами и правилами требуется перевод их в безопасное состояние, т.е. радиоактивный металл необходимо извлечь, переработать и кондиционировать. Для высокоактивных металлических отходов, по которым обосновано, что риски извлечения отходов превышают риски оставления их на месте, должно быть принято решение по созданию дополнительных барьеров безопасности.

Выполнение данных мероприятий позволит в конечном итоге минимизировать издержки по хранению металлических РАО, обеспечить надежность и безопасность их хранения.

При этом выбор технологий на всех этапах кондиционирования металлических радиоактивных отходов, в первую очередь, должен оп-

ределяться требованиями обеспечения радиационной безопасности персонала и требованиями обеспечения минимального воздействия проводимых работ на окружающую среду. В качестве базовой концепции в разрабатываемых проектах должен быть принят принцип безопасности при эксплуатации технологического оборудования на всех этапах работ.

Список литературы

1. Чернорот В.А. Совершенствование технологии и оборудования для высокотемпературной переработки твердых радиоактивных отходов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Екатеринбург, 2012 г. – 23 с.
2. Муратов О.Э. Радиоэкологические аспекты обращения с РАО и ОЯТ / О.Э. Муратов, М.Н. Тихонов [Электронный ресурс] // Атомная стратегия. – Санкт-Петербург, 2015. – режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6293>.
3. Объединенная конвенция о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами, Вена: МАГАТЭ, INFCIRC/546, 1997.
4. Об использовании атомной энергии: Федеральный закон от 21 ноября 1995 г., № 170-ФЗ.
5. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федеральный закон от 11 июля 2011 г., № 190-ФЗ.
6. Нормы радиационной безопасности НРБ-99-2009. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09, Главный государственный санитарный врач Российской Федерации, 2009 г.
7. Санитарные правила обращения с радиоактивными отходами СПОРО-2002, СП 2.6.6.1168-02, Главный государственный санитарный врач Российской Федерации, 2002 г.
8. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности ОСПОРБ-99/2010, СП 2.6.1.2612-10, Главный государственный санитарный врач Российской Федерации, 2010 г.
9. НП-020-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности»
10. Технический отчет. Обследование и инвентаризация системы обращения с РАО на АЭС, анализ технологических схем обращения с РАО, разработка предложений по результатам обследования / ЗАО «Неолант», 2013 г. – 68 с.
11. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2015 году / М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2016 г. – 361 с.
12. Стахив М.Р. Стратегия обращения с РАО ОАО «Концерн Росэнергоатом» / [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/2015/Materials/9_november/Staxiev.pdf.
13. Муратов О.Э. Снятие АЭС с эксплуатации: проблемы и пути решения / О.Э. Муратов, М.Н. Тихонов [Электронный ресурс] // Атомная стратегия. – Санкт-Петербург, 2008. – режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1198>.
14. Зимин В.К. Вывод из эксплуатации как элемент управления сроком службы многоблочной АЭС / В.К. Зимин, И.И. Корнеев [Электронный ресурс] // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды, № 3, 2012 г. – режим доступа: www.atomic-energy.ru/articles/2014/11/14/52951.
15. Черемисин П.И. Что делать с металлическими РАО? / П.И. Черемисин [Электронный ресурс] // Атомная стратегия. – Санкт-Петербург, 2015. – режим доступа: <http://www.proatom.ru/modules.php?file=article&name=News&sid=560>.

References

1. Chernorot V.A. *Sovershenstvovanie texnologii i oborudovaniya dlya vysokotemperaturnoj pererabotki tverdyx radioaktivnyx otxodov. Avtoreferat dissertacii na soiskanie uchenoj stepeni kandidata texnicheskix nauk.* [Enhancement technology and facility of high-temperature processing of solid radioactive waste. Candidate of technical science dissertation aftoreferat]. Ecaterinburg, 2012 y. – 23 p.
2. Muratov O.E. Radioecological aspects of RW and NFW treatment/ O.E. Muratov, M.N. Tihonov [Electronic source] *Atomnaya strategiya*. – Saint-Petersburg, 2015. – Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6293>.
3. *Obedinennaya konvenciya o bezopasnosti obrashheniya s otrabotavshim toplivom i o bezopasnosti obrashheniya s radioaktivnymi otxodami* [United convention of treatment safety with used fuel and of treatment safety with radioactive waste], Vein: IAEA, INFCIRC/546, 1997.
4. *Ob ispolzovanii atomnoj energii* [Usage of nuclear power: Federal law] (November 21, 1995 y.), N170-FZ.
5. *Ob obrashhenii s radioaktivnymi otxodami i o vnesenii izmenenij v otдельnye zakonodatelnye akty Rossijskoj Federacii* [Usage of radioactive waste and changes in some legislative acts in Russian Federation] Federal law (July 11, 2011 y.), N190-FZ.
6. *Normy radiacionnoj bezopasnosti NRB-99-2009. Sanitarnye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09*.

- 09 [Regulations of radiation safety NRB- 99-2009. Sanitary rules and regulations SanPiN 2.6.1.2523-09], Head state sanitary doctor of Russian Federation, 2009 y.
7. *Sanitarnye pravila obrashheniya s radioaktivnymi otxodami SPORO-2002, SP 2.6.6.1168-02* [Sanitary rules of radioactive waste handling SPORO-2002, SP 2.6.6.1168-02], Head state sanitary doctor of Russian Federation, 2002 y.
 8. *Osnovnye sanitarnye pravila obespecheniya radiacionnoj bezopasnosti OSPORB-99/2010, SP 2.6.1.2612-10* [Main sanitary rules of radiation safety securing OSPORB-99/2010, SP 2.6.1.2612-10], Head state sanitary doctor of Russian Federation, 2010 y.
 9. NP-020-15 *Federalnye normy i pravila v oblasti ispolzovaniya atomnoj energii «Sbor, pererabotka, xranenie i kondicionirovanie tverdyx radioaktivnyx otxodov. Trebovaniya bezopasnosti»* [Federal regulations and rules of safe nuclear power use “Collection, processing, storage and conditioning of solid radioactive waste. Safety demands”]
 10. *Texnicheskij otchet. Obsledovanie i inventarizaciya sistemy obrashheniya s RAO na AES, analiz texnologicheskix sxem obrashheniya s RAO, razrabotka predlozhenij po rezultatam obsledovaniya* [Technical report. Inspection and inventory of RW management system on NPP, analysis of technological schemes of RW handling, developing of proposals on the base of inspection] / ZAO “Neolant”, 2013 y. – 68 p.
 11. *Godovoj otchet o deyatelnosti Federalnoj sluzhby po ekologicheskomu, texnologicheskomu i atomnomu nadzoru v 2015 godu* [Annual report of Federal service on ecological, technological and atomic control work at 2015 year] / M.: ZAO “Nauchno-texnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti”, 2016 y. – 361 p.
 12. Stahiv M.P. *Strategiya obrashheniya s RAO* [Strategy of RW management] OAO “Concern ROSenergoatom” / [Electronic source] – Available at: http://www.atomeco.org/mediafiles/u/files/2015/Materials/9_november/Staxiev.pdf.
 13. Muratov O.E. Withdrawal of exploitation NPP: problems and their solving / O.E. Muratov, M.N. Tihonov [Electronic source] *Atomnaya strategiya*. – Saint-Petersburg, 2008. – Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=1198>.
 14. Zimin V.K. Withdrawal of exploitation as element of usage period administration of multibank NPP / V.K. Zimin, I.I. Kornev [Electronic source] *Bezopasnost yadernih tehnologij i okruzhayushey sredi*, № 3, 2012 y. — Available at: www.atomic-energy.ru/articles/2014/11/14/52951.
 15. Tcheremisin P.I. What should we do with metal RW? / P.I. Tcheremisin [Electronic source] *Atomnaya strategiya*. – Saint-Petersburg, 2015. – Available at: <http://www.proatom.ru/modules.php?file=article&name=News&sid=560>.

УДК 621.175

Некоторые особенности воздействия АЭС на окружающую среду

В.А. Седнев¹, Н.А. Мороз², Т. Н. Замыслова³, С.А. Чупрынин⁴, М.А. Костов⁵

АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных станций»,
ул. Ферганская, 25, г. Москва, 109507, Россия,

¹sednevva@mail.ru, ²sv_nata@mail.ru, ³zamytanya@yandex.ru, ⁴chuprynin.78@ua.fm, ⁵m_kostov@bk.ru

Статья поступила 19.09.2016 г.; после доработки 23.09.2016 г.

Аннотация

В настоящее время все большую актуальность и значимость приобретает проблема безопасности при эксплуатации оборудования и систем АЭС. В значительной степени это относится и к системе технического водоснабжения, предназначенной для отвода тепла от различного оборудования, в первую очередь, от конденсаторов турбин. В статье проанализированы некоторые из существующих систем оборотного технического водоснабжения на АЭС, описаны условия работы различных типов градирен на АЭС. Приведены данные об особенностях испарительных градирен и их влиянии на окружающую среду. Определены факторы, влияющие на выбор системы технического водоснабжения, выбран наиболее приемлемый тип градирни с позиции надежности и экологической безопасности. Выбор данного типа градирен позволяет минимизировать их влияние на окружающую среду.

Ключевые слова: градирня, системы водоснабжения, тепловое загрязнение.

Peculiarities of nuclear power plant influence on the environment

V.A. Sednev¹, N.A. Moroz², T.N. Zamislova³, S.A. Chuprinin⁴, M.A. Kostov⁵

JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation»,
25 Ferganskaya st., Moscow, 109507, Russia,

¹sednevva@mail.ru, ²sv_nata@mail.ru, ³zamytanya@yandex.ru, ⁴chuprynin.78@ua.fm, ⁵m_kostov@bk.ru

Received 19.09.2016 y.; received in final form 23.09.2016 y.

Abstract

Safety problems that occur during operating the facilities and systems in nuclear power plants are of current actuality and importance. It is substantially refers to the system of technical water supply, that is intended to cool different equipment (most of all turbine condensers). In the article the analysis of present reverse technical water-supply systems in nuclear power plants is given, the operation condition of different coolers types in nuclear power plant is described. Also the data about special features of vaporizing coolers has been shown and their influence on environment is discussed. Factors influencing the selection of water-supply system are described. On the basis of reliance and ecological safety the most acceptable cooler type has been chosen. The selection of such type of cooler allows minimizing influence on the environment.

Key words: cooler, water-supply system, thermal pollution.

Введение

На АЭС с энергоблоками первого поколения использовались искусственные пруды-охладители, причем выбор именно этого типа охладителя был сделан, в основном, по рекомендации турбинных заводов для достижения на-

ивысшей экономичности. Данные устройства наиболее простые, их применение позволяет достигать лучшего охлаждения воды и обеспечивать наиболее глубокий вакуум в конденсаторах турбоагрегатов. Известно, что для Чернобыльской АЭС был сооружен пруд-охладитель

площадью 25 квадратных километров и глубиной 4 метра. Пруд-охладитель с такой внушительной площадью мог быть размещен только вне промышленной площадки ЧАЭС. В результате аварии на четвертом энергоблоке ЧАЭС в пруд-охладитель была занесена значительная радиоактивность, а дезактивация пруда-охладителя до сих пор не начата [1].

После аварии на Чернобыльской АЭС вместо прудов-охладителей в новых проектах АЭС-2006 (на Ленинградской АЭС-2, Нововоронежской АЭС-2, в проекте Балтийской АЭС) в качестве охладительных устройств в системе оборотного технического водоснабжения на АЭС стали применять испарительные градирни, которые можно разместить в пределах площадки, отведенной для строительства АЭС.

К недостаткам градирен относятся высокая стоимость, сложность конструкции, значительная затрата материалов и необходимость использования высококвалифицированной рабочей силы для сооружения и ремонта [2]. Однако, компактные по сравнению с другими типами охлаждающих устройств (пруды-охладители, брызгальные бассейны) размеры и возможность размещения в пределах промышленной площадки АЭС делают строительство градирен предпочтительным.

На АЭС в качестве охладителей в системе оборотного технического водоснабжения применяются все три типа градирен. Так, испарительные градирни, например, были сооружены на энергоблоках № 3, 4 Нововоронежской АЭС и на энергоблоках № 6, 7 Нововоронежской АЭС-2, «сухая» градирня на искусственной тяге – на заполярной Билибинской АТЭЦ, гибридная градирня на искусственной тяге – на энергоблоке № 2 АЭС «Неккарвестхайм» (Германия).

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – охарактеризовать условия работы различных типов градирен на АЭС и выбрать наиболее приемлемый тип градирни с позиции надежности и экологической безопасности.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести анализ некоторых из существующих систем оборотного технического водоснабжения на АЭС, условий работы различных типов градирен на АЭС;

- определить факторы, влияющие на выбор системы технического водоснабжения.

Анализ работы различных типов градирен

Испарительные градирни работают по принципу испарительного охлаждения, то есть отвод теплоты в воздух происходит за счет парообразования части охлаждающей воды с выбросом в атмосферу образовавшегося пара. Кроме того, оборотные системы имеют потери воды, уносимой с паром, и постоянную подпитку.

Для АЭС применяют только башенные градирни, обычно противоточного типа, в которых движение воздуха происходит вверх за счет разности плотностей нагретого воздуха внутри башни и холодного вне ее, а движение охлаждаемой воды – вниз.

Количество воды, теряемое оборотной системой на испарение, примерно равно расходу пара в конденсаторы турбин, то есть довольно значительно, хотя существенно меньше, чем расход охлаждающей воды, циркулирующей через конденсаторы. Для АЭС мощностью 1000 МВт расход воды на испарение в охладителе (испарительной градирне) оборотной системы, то есть потеря воды в циркуляционной системе, составляет около 3000 т/ч [3].

К влиянию испарительных градирен на окружающую среду можно отнести:

- 1) Воздействие на климатические условия:
 - возрастание дефицита пресной воды;
 - интенсификация парникового эффекта;
 - образование облаков и тумана.
- 2) Воздействие на близкорасположенные здания и сооружения:
 - увлажнение зданий, линий электропередачи, путей сообщения;
 - образование плесени в жилых зданиях;
 - обледенение зданий, линий электропередачи при отрицательных температурах;
 - угроза безопасности транспорта (обледенение, туман).

«Сухие» градирни представляют собой теплообменные сооружения, в которых теплопередающей поверхностью служат радиаторы из оребренных трубок. Для создания тяги такие градирни могут быть оборудованы вентиляторами или вытяжной башней. Охлаждение воды происходит внутри оребренных трубок без непосредственного контакта воды и атмосферного воздуха. С наружных поверхностей радиаторов тепло отводится передается потоку воздуха. Нагре-

тый в градирне воздух, выходя из устья башни градирни, рассеивает свое тепло в атмосфере.

Конструкция градирни представляет собой набор радиаторов, изнутри омываемых водой, а снаружи – воздухом. Для уменьшения поверхности теплообмена радиаторы изготавливают из алюминиевых сплавов, имеющих большой коэффициент теплопроводности. Преимущества таких градирен – практическое отсутствие потерь воды и заводское изготовление секций, облегчающее и ускоряющее монтаж такой градирни. Габариты и стоимость таких градирен не меньше, чем обычных, но вакуум в главном конденсаторе турбоагрегата хуже. Поэтому они предпочтительнее в безводных районах, где вопросы восполнения убыли воды имеют первостепенное значение.

В российской атомной энергетике оборотная система технического водоснабжения с использованием вентиляторных «сухих» градирен реализована на заполярной Билибинской АТЭЦ. В этих системах очищенная технологическая вода проходит и охлаждается внутри поверхностных алюминиевых охладителей, снаружи охлаждаемых воздушным потоком от вентиляторов с электроприводами. Подпитка системы технического водоснабжения осуществляется из специально созданного водохранилища на ручье Б. Поннеурген.

Система комбинирования сухого и орошаемого охлаждения типа HEAD (Heller-EGI Advanced Dry/Deluged – усовершенствованная система сухого/орошаемого охлаждения Геллер-ЭГИ) работает с сухим охлаждением весь год, за исключением наиболее жаркого летнего периода, когда вода подается и на специально перфорированные плоские пластины трубчатопластинчатых теплообменников.

В гибридных градирнях выходной воздух влажной секции смешивается с нагретым воздухом оребренных трубных пучков сухой секции, установленных в стенках выше влажной секции общего башенного вытяжного корпуса. Гибридная градирня, не образующая парового шлейфа, наилучший вариант в том случае, когда действуют ограничения местных норм и правил, при которых присутствие парового шлейфа не допускается в нормальных условиях, в частности, вдоль автомагистралей, вблизи аэропортов, жилых районов. Например, на энергоблоке АЭС «Неккарвестхайм» (Германия) с электрической мощностью 1400 МВт фирмой «SPX Cooling Technologies» в 1989 г. сооружена гибридная градирня на искусственной тяге. Высота градирни – 51,2 м. Смысл использования гибридной

системы на АЭС «Неккарвестхайм» состоял в том, что вокруг электростанции имеется большое количество сельхозугодий, в том числе большие площади виноградников, требовательных к условиям освещения и влажности.

Французская группа AREVA предложила строительство на берегу Чесапикского залива в южном штате Мериленд двух ядерных реакторов на АЭС «Калверт Клиффс» со стоимостью проекта энергоблока 4 млрд. долларов [3]. По французскому проекту в системе водоснабжения планируется применить гибридную градирню. Стоимостью гибридной градирни – 125 млн. долларов на каждый энергоблок, что составит примерно 3,2 % его стоимости. При применении традиционных башенных испарительных градирен их стоимость составит около 1,2 % от стоимости энергоблока. Два действующих сейчас энергоблока PWR прокачивают каждый по 273600 м³/час воды из залива. В залив возвращают воду, нагретую примерно на 10 градусов. При этом ежегодно гибнет большое количество рыб.

По правилам, принятым американским агентством защиты окружающей среды в 2001 году, на новых АЭС требуется использовать передовые технологии, не допускающие, в частности, гибели водной фауны. Новый энергоблок будет забирать из залива на 98% воды меньше, чем два действующих, построенных в 1970-е годы. Относительно малая высота градирни (50,3 м) соответствует новым современным требованиям: градирню можно будет видеть только с моря, но не из ближайших населенных пунктов.

Системы отвода сбросного тепла с «сухими» градирнями более дорогие, однако их применение перспективно в связи с обостряющимся дефицитом природной воды и ожидаемым ростом ее дороговизны [4]. Кроме того, надо учитывать, например, что закон США «О чистой воде», принятый еще в 1972 г., требует, чтобы размещение, проектирование, строительство и мощность охлаждения водозаборных сооружений основывалось на передовых технологиях, сводящих к минимуму неблагоприятные воздействия АЭС и других тепловых электростанций, а также ГЭС, на окружающую среду.

Анализ факторов, влияющих на выбор системы технического водоснабжения АЭС

Основным газом, создающим парниковый эффект, является водяной пар. Относительное содержание водяного пара в атмосфере менее

0,3 %. Следующий по значению парниковый газ – диоксид углерода с относительным содержанием порядка 0,03 %. Относительное содержание остальных парниковых газов не превосходит 3×10^{-4} % [4]. В настоящее время парниковый эффект примерно на 78 % обусловлен парами воды и только на 22 % углекислым газом за счет сброса тепла в окружающую среду через испарительную градирню АЭС [4]. В результате испарения содержание циркуляционной воды возрастает, для поддержания концентрации солей в допустимых пределах осуществляют продувку циркуляционной системы или применяют химическую обработку добавочной воды. Для предотвращения обрастания оросителей водорослями в циркуляционную воду вводят специальные химические вещества. Для поддержания качества воды на требуемом уровне осуществляют продувку в размере 5 – 6% объема всей системы. Убыль воды в связи с ее испарением и продувкой восполняют подачей добавочной воды.

При выборе системы технического водоснабжения на АЭС учитывают следующие факторы:

- требуемый уровень поддерживаемой температуры;
- допустимая трудоемкость технического решения;
- местные климатические факторы: наличие больших источников воды, доступность неограниченного водозабора, продолжительность и характеристика жаркого периода;
- местные специфические факторы: степень развитости региона, наличие стратегических объектов (аэропорт и т.д.), плотность населения, эстетические проблемы, социальная активность;
- технические факторы: ограничения по площади, допустимая потребляемая мощность;
- послегарантийные проблемы оборудования: база данных по неисправностям на объектах, сведения об авариях, последствия аварийных ситуаций;
- субъективные факторы: предпочтения инвесторов, предпочтения местных властей;
- стоимостные факторы: срок окупаемости инвестирования, бюджет на проект: капитальные и эксплуатационные расходы, стоимость квалифицированного обслуживания;

- экологические факторы: тепловое загрязнение, утилизация продувочной воды, допустимый уровень шума.

При выборе конструкции градирни целесообразно учитывать также мнение местных жителей о допустимости локального облака, образующегося из выходящего устья градирни испаряемой влаги. Из-за этого фактора в Германии на АЭС «Неккарвестхайм» были применены гибридные градирни с целью исключения поглощения солнечных лучей над многочисленными местными виноградниками.

Высоты гибридных градирен: для АЭС «Неккарвестхайм» равна 51,2 м, а для проекта французской фирмы AREVA равна 50,3 м.

Относительно малая высота градирни (50,3 м) соответствует новым современным требованиям: градирню можно будет видеть только с моря, но не из ближайших населенных пунктов.

Высоты испарительных градирен новых энергоблоков мощностью 1200 МВт для НВАЭС-2 равны 172,5 м, а для ЛАЭС-2 – 167 м.

Заключение

На основании анализа, с позиции надежности и экологической безопасности наиболее приемлемым типом градирни является гибридная градирня. Выбор данного типа градирен позволяет минимизировать их влияние на окружающую среду.

Комбинация двух разных систем охлаждения в гибридных градирнях объединяет не только их преимущества, но и негативные стороны обеих систем.

В гибридной системе сухое охлаждение является основным, испарение применяется только для снятия летнего пика.

Наряду с применением гибридной градирни возможно еще несколько вариантов по реализации комбинированного охлаждения [5]:

- предварительное охлаждение воздуха путем распыления воды;
- применение комбинированных теплообменников с орошением;
- совместная работы сухой градирни с испарительной (различные схемы включения).

Список литературы

1. Исаев А.Н. Обобщенные принципы безопасности / А.Н. Исаев // Атомная техника за рубежом. – 2007. – №4. – С. 3 – 9.

2. Маргулова Т.Х. Атомные электрические станции. Учебник для вузов. – Изд. 5-е. – М.: ИздАТ, 1994. – 289 с.
3. Болдырев В.М., Клейменов П.Г. Значимость «сухих» градирен для АЭС и других тепловых электростанций / В.М.Болдырев, П.Г. Клейменов [Электронный ресурс] //Промышленные ведомости, №3, май-июнь 2015 г. – режим доступа: <http://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2843&nomer=95>
4. Казарин А.М. Обоснование выбора системы технического водоснабжения энергоблоков ЛАЭС-2 / Материалы VII Международного Общественного Форума-диалога «Атомная энергия, общество, безопасность 2012» (Россия, Санкт-Петербург, 5-6 сентября 2012 г.) [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VII_forum_2012/Kazarin.pdf
5. Дьердь Бергманн. Возможность применения сухих градирен системы Геллера в комбинации с пиковыми испарительными градирнями для охлаждения энергоблоков ЛАЭС-2 / Материалы VII Международного Общественного Форума-диалога «Атомная энергия, общество, безопасность 2012» (Россия, Санкт-Петербург 5–6 сентября 2012 г.) [Электронный ресурс] – режим доступа: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VII_forum_2012/Bergman.pdf
2. Margulova T.H. *Atomnie elektricheskie stancii. Uchebnik dlya vuzov*. [Nuclear power plant. University student book]. 5th IzdAT Publ., 1994, 289 p.
3. Boldirev V.M., Kleymenov P.U. The importance of “dry” coolers for NPP and other thermoelectric power station / V.M. Boldirev, P.G. Kleymenov [Electronic source] // *Promishlennye vedomosti*, №3, May-June 2015. – Available at: <http://www.promved.ru/articles/article.phtml?id=2843&nomer=95>
4. Kazarin A.M. Substantiation of selection the system of technical water-supply of power-generating units in LAES-2. *Materialy VII Mezhdunarodnogo Obshestvennogo Foruma-dialoga “Atomnaya energiya, obshchestvo, bezopasnost 2012”* [Abstracts of VII International Public Forum-dialog “Nuclear power, society, safety 2012”]. – *Sankt-Peterburg*, 5-6 September 2012. – Available at: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VII_forum_2012/Kazarin.pdf
5. Djord Bergmann. Possibility of using the dry Geller’s cooling systems with awkward vaporizing coolers for cooling the power-generating units. *Materialy VII Mezhdunarodnogo Obshestvennogo Foruma-dialoga “Atomnaya energiya, obshchestvo, bezopasnost 2012”* [Abstracts of VII International Public Forum-dialog “Nuclear power, society, safety 2012”]. – *Sankt-Peterburg*, 5-6 September 2012. – Available at: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/VII_forum_2012/Bergman.pdf

References

1. Isaev A.N. Assumed safety principles. *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 2007, No. 4, pp. 3-9.

УДК 621.039.7

Математическая модель процессах очистки технологических сред от радионуклидов и других примесей на АЭС сорбентами на основе лигнина

Н.И. Черкашина¹

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹selyanskij-as@ya.ru

Статья поступила 09.09.2016 г.; после доработки 14.09.2016 г.

Аннотация

Получена математическая модель, описывающая процессы фильтрации через слой сорбента с учетом порозности слоя, коэффициента распределения; относительной сорбции с учетом времени; массоперенос с учетом лимитирующей стадии – внутренней диффузии. Изучены сорбционные характеристики лигнинового материала как на модельных системах, так и на реальных технологических отходах АЭС, жидких РАО (очистка от радионуклидов стронция, цезия, кобальта, трансурановых элементов) сложного состава (ПАВы, соли, тяжелые металлы), при различных значениях pH.

Ключевые слова: сорбент, гидролизный лигнин, механохимическая обработка, Фолиоокс, лигниносодержащий материал

A mathematical model of the processes of purification of process media from radionuclides and other impurities in NPP sorbents based on lignin

N.I. Cherkashina¹

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
¹selyanskij-as@ya.ru

Received 09.09.2016 y.; received in final form 14.09.2016 y.

Abstract

A mathematical model describing the processes of filtration through a layer of sorbent taking into account the porosity of the layer, the spreading factor, the relative adsorption with respect to time; a mass transfer taking into account the limiting stage is the internal diffusion. Studied sorption characteristics of ligninases material both on model systems and on real technological waste from NPP liquid wastes (purification from radionuclides of strontium, cesium, cobalt, transuranic elements) complex composition (surfactants, salts, heavy metals) at different pH values.

Keywords: sorbent, lignin, mechanochemical processing, Folioks, lignindegrading material.

Введение

Сравнительно большая емкость сорбентов позволяет очищать 100 объемов жидких радиоактивных отходов на одном объеме сорбента. В то же время материал характеризуется малой зольностью и позволяет после отжига получать компактные высокоактивные твердые РАО. Благодаря этому технология дезактивации с использованием модифицированного сорбента дает возможность уменьшить объемы РАО, отправляемых на отверждение и далее на захоронение, до 250 раз. Высокая радиационная стойкость лигнина позволила рассмотреть возможности этих материалов для концентрирования отходов ядерного топлива – радиоактивных изотопов цезия, стронция, кобальта и других элементов из воды первого контура АЭС.

Разработанный сорбент может использоваться в качестве фильтрующего материала в действующих линиях очистки и кондиционирования ЖРО для осветлительных (механических) фильтров, а также в качестве ионообменного материала в колоннах ионных фильтров для очистки от радионуклидов и различных примесей (ПАВ, соли, органические вещества).

Важной особенностью сорбента является его индифферентность к легким металлам, радионуклидам – Cs , Na , Ca и другим элементам, изменение концентрации солей которых от 1 до 100 г/л не оказывает существенного влияния на сорбционные показатели. Кроме того, сорбент устойчиво работает в растворах с высоким содержанием поверхностно-активных веществ (до 5 г/л) и органических примесей (до 0,1 г/л).

Постановка цели научной работы

Цель исследования построить математическую модель процесса очистки ЖРО от радионуклидов и примесей и экспериментально проверить достоверность и эффективность очистки полученным сорбентом на реальных технологических средах.

Задачи: выявить зависимость и описать математически эффективности сорбции ЖРО при изменении скорости, величины активности, радионуклидного состава, концентрации солей и ПАВ а так же динамических характеристик.

Для описания любого физико-химического процесса, в том числе и сорбционного, как известно, может быть использована целая иерархия математических моделей разной степени

детализации и сложности [1]. Практическая значимость таких моделей определяется их соответствием экспериментальным данным при не очень сложных, доступных для современной вычислительной техники, методах расчета.

Одна модель может описывать лишь некоторые аспекты указанного процесса, но достаточно детально, а другая – все его основные проявления, но в значительно более сжатой форме. Ввиду сложности рассматриваемых процессов развитие и тех, и других моделей важно. Они дополняют друг друга.

Теоретические основы составления математической модели

В ионообменных и сорбционных процессах достаточно популярны математические модели, которые тем или иным способом прямо учитывают влияние электрического поля ионов на внутреннюю диффузию в ионитах [2-3].

В процессе ионного обмена можно выделить несколько разделенных во времени и пространстве последовательных стадий, основными из которых являются следующие:

- доставка десорбирующего иона из раствора к поверхности зерна ионита, осуществляемая совместно диффузией и конвекцией;
- доставка десорбирующего иона (как правило, за счет диффузии) от поверхности зерна ионита к некоторой точке в его объеме, в которой происходит обмен;
- собственно ионообменный процесс (химический процесс);
- отвод десорбированного иона (как правило за счет диффузии) от места десорбции к поверхности зерна ионита;
- отвод десорбированного иона от поверхности зерна ионита в объем раствора (диффузия и конвекция);

Стадии 1 и 5 – это стадии массопереноса, стадии 2 и 4 – стадии массопередачи, 3 – химическая стадия.

Совокупное рассмотрение всех стадий ионного обмена трудно осуществимо, поэтому на практике обычно прибегают к упрощениям, используя известный принцип лимитирующей стадии, согласно которому скорость процесса, идущего в несколько последовательных стадий, определяется скоростью наиболее медленной из них.

Технический подход к решению практических инженерных задач в данном направлении должен основываться на результатах аналитиче-

ского рассмотрения комплекса вопросов, которые тематически можно формулировать так: формальная кинетика гетерогенной сорбции и динамика сорбционной очистки сложных растворов; динамика сорбции и гидродинамика процесса очистки радиоактивно загрязненных вод (РЗВ) в различных режимных условиях; начальное и оперативное тестирование сорбентов, задача и технология реализации; оптимизация самодостаточных технологий очистки и утилизации жидких отходов по ключевым параметрам; основы гибкой технологии в сфере обращения с РЗВ различного происхождения; сорбционно-термическая технология очистки ЖРО и ее применение; создание высокотехнологичной системы сорбционной очистки ЖРО; разработка инструмента комплексных расчетов высокоэффективных сорбционных систем, отвечающих требованиям высоких технологий; изменение концепции обращения с ЖРО на АЭС; направления и задачи специальных и прикладных исследований в сфере сорбционных технологий обращения с ЖРО на отечественных объектах ядерной энергетики.

Процесс ионного обмена хорошо изучен в технологическом, аппаратном, физико-химическом аспектах [4-5]. Скорость процесса ионного обмена контролируется механизмом диффузии и в определенной мере зависит от свойств самого ионообменного материала, в первую очередь – его диффузионной проницаемости. Однако для того, чтобы корректно и полно оценивать эффективность воздействия электрического поля на систему, необходимо иметь достаточно четкие критерии, которые могли бы быть получены в лабораторных условиях и адекватно характеризовать результат любого воздействия на систему.

Поскольку большинство ионитов представляют собой твердые тела, ионный обмен имеет сходство с адсорбцией, по этой причине иногда называют ионный обмен ионообменной сорбцией, а иониты – ионообменными сорбентами [6].

Сравнивая результаты физического и численного моделирования, можно обоснованно выбрать и определить характерные кинетические константы процесса в реальных условиях и установить характер действующих в системе закономерностей, представляющих интерес для управления работой системы.

Запишем уравнение Фика по второму закону для диффузионного переноса компонента из жидкой фазы применительно к однонаправлен-

ному перемещению поглощаемого компонента (ПК) вдоль неподвижного слоя [7]:

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + w_l \frac{\partial C}{\partial l} = D_{эф} \frac{\partial^2 C}{\partial l^2}, \quad (1)$$

где C – концентрация микрокомпонента в жидкости;

l – координата перемещения микрокомпонента вдоль неподвижного слоя;

w_l – скорость перемещения жидкости через зернистый материал;

$D_{эф}$ – эффективный коэффициент диффузии.

Данное уравнение не учитывает порозность слоя, коэффициент распределения требует определения лимитирующей стадии процесса (внутренней, внешней или смешанной диффузии).

Приведем более близкое к описанию процесса фильтрации через слой сорбента математическое выражение:

$$\varepsilon_0 \frac{\partial C}{\partial \tau} + K_p (1 - \varepsilon_0) \frac{\partial x}{\partial \tau} + w_l \frac{\partial C}{\partial l} = D_{эф} \frac{\partial^2 C}{\partial l^2}, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент распределения;

x – концентрация микрокомпонента в слое сорбента в момент времени τ ;

ε_0 – порозность слоя, отношение пустот между частицами к объему, занятому этим материалом и может быть рассчитана по следующей формуле:

$$\varepsilon_0 = \frac{(V - V_\tau)}{V} = \frac{V_0}{V}, \quad (3)$$

где V – общий объем, занимаемый зернистым слоем;

V_0 – свободный объем слоя;

V_τ – объем, занимаемый частицами, образующими слой.

Характер транспорта радионуклидов в поры сорбента оценивался также по эффективному коэффициенту диффузии $D_{эф}$, который является величиной, обратно пропорциональной сопротивлению сорбции. Его значения определялись по уравнению диффузии в пористом сорбенте (уравнение Баррера):

$$D_{эф} = \frac{\pi \cdot s^2}{4 \tau} \cdot \left(\frac{V}{S} \right)^2, \quad (4)$$

где $D_{эф}$ - эффективный коэффициент диффузии, $\text{см}^2/\text{с}$;

s - величина относительной адсорбции к моменту времени τ ;

τ - время адсорбции, с;

V - объем гранулы сорбента, см^3 ;

S - площадь наружной поверхности гранул, см^2 .

С учетом формул (2) - (4) математическая модель примет вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_0 \frac{\partial C}{\partial \tau} + K_p (1 - \varepsilon_0) \frac{\partial x}{\partial \tau} + w_l \frac{\partial C}{\partial l} = D_{эф} \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} \\ D_{эф} = \frac{\pi \cdot s^2}{4\tau} \cdot \left(\frac{V}{S} \right)^2 \end{cases}$$

Рассчитанные максимальные и минимальные значения $D_{эф}$ для радионуклидов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Коэффициенты диффузии радионуклидов сорбентом «Фолиоокс-КМП» из раствора

Радионуклид	Коэффициент диффузии $D_{эф} \cdot 10^9, \text{см}^2/\text{с}$	
	максимальный	минимальный
^{90}Sr	8,2	0,75
^{137}Cs	7,5	0,54
^{60}Co	7,3	0,3

При этом меньшие величины коэффициентов диффузии $D_{эф}$ достигаются на заключительной стадии сорбционного процесса.

При этом меньшие величины коэффициентов диффузии $D_{эф}$ достигаются на заключительной стадии сорбционного процесса.

Наличие максимума у зависимости $D_{эф} = f(\tau)$ при сорбции радионуклидов из растворов можно объяснить наличием воздуха в порах сорбента на начальной стадии сорбции (10-30 минут). Препятствуя транспорту через макропоры к микропорам, пузырьки воздуха вносят в процесс дополнительное диффузионное сопротивление.

Результаты расчета коэффициентов диффузии показали, что в широком интервале значений концентрации радионуклидов в растворе и продолжительности сорбционного процесса зависимость эф-

фективного коэффициента диффузии от времени сорбции носит экстремальный характер (рис. 1).

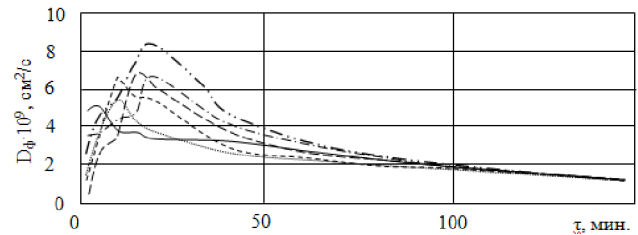


Рис. 1. График зависимости коэффициента диффузии $D_{эф}$ стронция-90 при концентрациях $(1 \div 80)\%$ от времени сорбции (τ):

По мере вытеснения воздуха величина дополнительного сопротивления уменьшается, и $D_{эф}$ возрастает, достигая максимальной величины; после удаления большей части воздуха эффективный коэффициент диффузии начинает уменьшаться, так как при заполнении радионуклидами пористой структуры растет и диффузионное сопротивление массопереносу. С увеличением концентрации сорбтива позиция максимума у радионуклидов сдвигается правее и выше, что также свидетельствует об активации переноса по мере возрастания количества молекул сорбтива в исходной смеси. Известно, что при сорбции радионуклидов сорбентом из жидкой фазы для исследования возможности лимитирования сорбции внутридиффузионным сопротивлением можно воспользоваться уравнением:

$$s^2 = 3\varphi - 3\varphi^2 + \varphi^3, \quad (5)$$

где $\varphi = \tau / \tau_\infty$ - относительное время.

Для обработки экспериментальных данных по уравнению (5) целесообразно пользоваться его линейной формой:

$$(1 - s^2)^{1/3} = 1 - \varphi = 1 - \tau / \tau_\infty, \quad (6)$$

тогда при справедливости уравнения (5) экспериментальные точки в координатах $[(1 - s^2)^{1/3}] - [\tau]$ должны располагаться на прямой линии (рис. 7).

Следовательно, система уравнений (2) - (6) примет вид

$$\begin{cases} \varepsilon_0 \frac{\partial C}{\partial \tau} + K_p (1 - \varepsilon_0) \frac{\partial x}{\partial \tau} + w_l \frac{\partial C}{\partial l} = D_{эф} \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} \\ D_{эф} = \frac{\pi \cdot s^2}{4\tau} \cdot \left(\frac{V}{S} \right)^2 \\ (1 - s^2)^{1/3} = 1 - \tau / \tau_\infty \end{cases}$$

Для выявления вклада миграции радионуклидов в общее сопротивление диффузионного массопереноса кинетика адсорбции рассматривалась в координатах $[s] - [\tau^{1/2}]$ (рис. 2), где s – величина относительной сорбции.

Как следует из рисунка 2, относительная сорбция ^{90}Sr из раствора (s) в диапазоне $s = 0 - (0,7 - 0,99)$ пропорциональна $\tau^{0,5}$ независимо от начальной концентрации радионуклида в растворе. Пропорциональное изменение s с ростом $\tau^{0,5}$ свидетельствует о существенной роли миграции радионуклида в первичной пористой структуре сорбента в общем сопротивлении диффузионному массопереносу при сорбции из жидкой фазы.

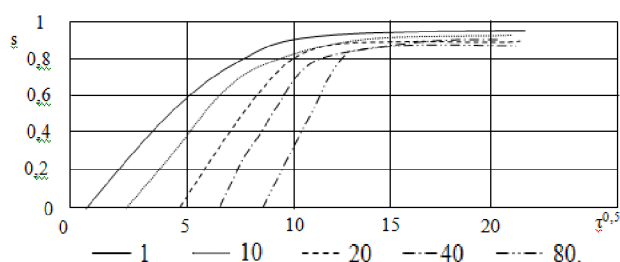


Рис. 2. Зависимость относительной сорбции ^{90}Sr из раствора от времени ($\tau^{0,5}$) сорбции (шаг по оси абсцисс для каждой концентрации стронция в пределах 1-80% равен $2^{0,5}$ мин):

Аналогичные данные получены и для других исследуемых радионуклидов. Из рисунка 3 видно, что с увеличением концентрации радионуклида (независимо от химических свойств) в смеси возрастает крутизна кинетических кривых, а это, в свою очередь, свидетельствует об активации переноса. Анализ изменения адсорбции как функции времени в координатах $[(1 - s^2)^{1/3}] - [\tau]$ показывает (рис. 3).

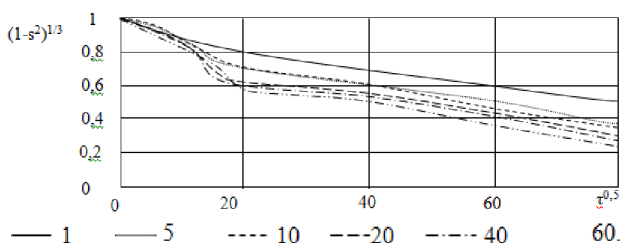


Рис.3. График в координатах $[(1 - s^2)^{1/3}] - [\tau]$ при сорбции ^{90}Sr в концентрациях от 1 до 80% в растворе сорбентом «Фолиокс-КМП»:

Для рассмотренных процессов условие выполняется, то есть внутридиффузное сопротивление является практически преобладающим в

общем сопротивлении сорбции. Аналогичные данные получены и для других исследуемых радионуклидов.

Исследование кинетики жидкофазной сорбции радионуклидов показало, что кинетика сорбции, лимитируемая внутренней диффузией, описывается уравнением Глюкауфа:

$$dC/d\tau = \beta_0 (A\partial_p - C_i) \quad (7)$$

где C_i – текущее значение концентрации адсорбента к моменту времени τ от начала сорбции;

$A\partial_p$ – равновесное значение гиббсовской адсорбции;

β_0 – коэффициент массопередачи, который можно интерпретировать как функцию отклика гидродинамической модели на импульсное возмущение.

С учетом этого итоговый вариант математической модели будет иметь вид:

$$\begin{cases} \varepsilon_0 \frac{\partial C}{\partial \tau} + K_p (1 - \varepsilon_0) \frac{\partial x}{\partial \tau} + w_l \frac{\partial C}{\partial l} = D_{\text{эф}} \frac{\partial^2 C}{\partial l^2} \\ D_{\text{эф}} = \frac{\pi \cdot s^2}{4\tau} \cdot \left(\frac{V}{S}\right)^2 \\ (1 - s^2)^{1/3} = 1 - \tau / \tau_{\infty} \\ dC/d\tau = \beta_0 (A\partial_p - C_i) \end{cases}$$

Коэффициент массопередачи может быть рассчитан как величина, обратная первому статическому моменту кинетической кривой:

$$\beta_0 = \int_0^{\tau} (1 - C/A\partial_p) d\tau / \int_0^{\tau} \tau (1 - C/A\partial_p) d\tau \quad (8)$$

Отношение внутреннего сопротивления массопереносу в зерне сорбента к внешнему сопротивлению из жидкости путем диффузии через пограничный вязкий слой к поверхности зерна определялось с использованием критерия Био:

$$H = \frac{T_{\text{внеш}}}{T_{\text{внут}}} = \frac{X_{\text{внеш}}}{X_{\text{внут}}} \quad (9)$$

где H – параметр, характеризующий относительный вклад внешней и внутренней диффузии. Если $H > 100$, то определяющей стадией является внутридиффузионная кинетика, $H < 1$ – внешнедиффузионная кинетика, если $1 > H > 100$ – смешаннодиффузионная кинетика [8].

При переходе к безразмерным переменным совокупность всех кинетических кривых, описывающих изменение концентрации вещества во времени

в растворе и в фазе сорбента, зависит только от двух безразмерных параметров X и T , имеющих смысл длины слоя сорбента и времени сорбции [8]:

$$X = x \cdot \frac{\beta}{v} - \text{безразмерная длина слоя ад-}$$

сорбента;

$$T = t \cdot \frac{\beta}{\Gamma} - \text{безразмерная продолжитель-}$$

ность сорбционного процесса,

где X и T , – значения безразмерных и размерных длины слоя сорбента и времени сорбции для совпадающих расчетной и экспериментальной динамических выходных (кинетических) кривых;

Γ – коэффициент распределения сорбата, мл/мл;

β – коэффициент массопереноса сорбата в растворе, с^{-1} ;

D – коэффициент диффузии сорбата внутри гранул сорбента, $\text{см}^2 \cdot \text{с}^{-1}$;

v – линейная скорость потока раствора, см/с ;

r – радиус гранул сорбента, см .

Результаты расчетов представлены в таблице 2.

Таблица 2 Расчет критерия Био при сорбции радионуклидов сорбентом «Фолиоокс-КМП»

Радионуклид	Начальная концентрация C , %	Критерий Био	
		при $D_{эф}$ максимальном	при $D_{эф}$ минимальном
^{90}Sr	1	715,588	3417,586
	20	663,257	4105,258
	80	476,259	4220,964
^{137}Cs	1	645,898	2840,025
	20	497,872	3020,567
	80	531,232	4145,251
^{60}Co	1	822,365	3283,473
	20	545,754	3852,621
	80	445,122	4023,867

Полученные данные подтверждают, что скорость сорбции радионуклидов в растворе зависит практически только от диффузии молекул внутри сорбента ($H > 30$), т.е. контролируется стадией внутридиффузионного массопереноса.

Проверка адекватности модели

Для проверки адекватности модели сравнивались рассчитанные и полученные экспериментальным путем значения относительной сорбции от времени для радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs на рисунке 4.

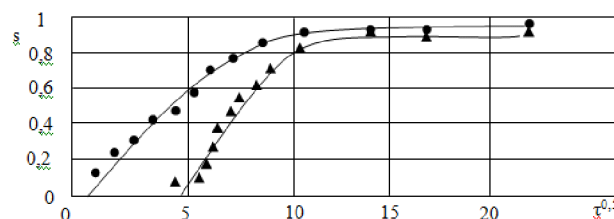


Рис. 4. Зависимость относительной сорбции ^{90}Sr и ^{137}Cs из раствора от времени ($\tau^{0.5}$) сорбции (шаг по оси абсцисс равен $2^{0.5}$ мин): кривые полученные расчетным путем, точки на кривых – полученные экспериментальные значения для

● – ^{90}Sr , ▲ – ^{137}Cs .

Также рассчитывали теоретическую зависимость количества извлеченного на сорбенте ^{90}Sr и ^{137}Cs от объема пропущенной пробы, значения параметров принимались соответственно: для ^{90}Sr $K_p = 860 \text{ см}^3/\text{г}$, для ^{137}Cs $K_p = 1090 \text{ см}^3/\text{г}$, для ^{90}Sr $D_\phi = 8,2 \cdot 10^9 \text{ см}^2/\text{с}$, для ^{137}Cs $D_\phi = 7,5 \cdot 10^9 \text{ см}^2/\text{с}$.

Исходные данные для проведения эксперимента и расчета: $A_{исх.общ} = 180000 \text{ Бк/л}$, где $A_{исх. Sr^{90}} = 13000 \text{ Бк/л}$, $A_{исх. Co^{60}} = 130000 \text{ Бк/л}$, $A_{исх. Cs^{137}} = 36000 \text{ Бк/л}$, скорость пропускания пробы 500 мл/ч , $m_{сорб} = 700 \text{ г}$, общий объем очищаемой воды 12 л .

Экспериментальная и теоретическая кривая представлены на рис. 5.

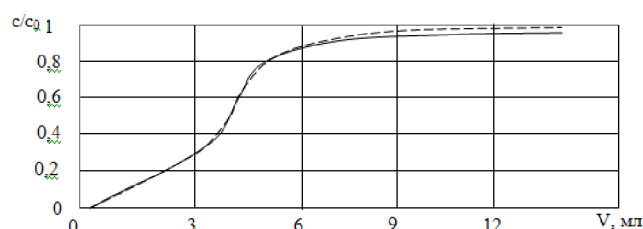


Рис. 5. Зависимость количества извлеченного ^{90}Sr и ^{137}Cs от объема очищаемого раствора:

— экспериментальные данные, ---- рассчитанные значения (c/c_0 – отношение концентраций на выходе из колонки к исходной концентрации радионуклидов в растворе)

На рис. 4 и 5 показано, что рассчитанные и экспериментальные кривые практически совпадают. Это позволяет считать предложенную модель справедливой для сорбента марки «Фолиокс-КМП» в рамках проведенных исследований.

Таким образом, полученная математическая модель описывает следующие процессы: фильтрацию через слой сорбента с учетом порозности слоя, коэффициента распределения; относительную сорбцию с учетом времени; массоперенос с учетом лимитирующей стадии – внутренней диффузии.

Выводы

1. Предложена математическая модель очистки ЖРО сорбентом «Фолиокс-КМП», адекватность которой подтверждена проведенными натурными испытаниями на реальных технологических средах АЭС [9-16], позволяющих использовать сорбент на штатном оборудовании и установленных технологических режимах.

2. Рассмотренная модель проверена на адекватность, следовательно математическое описание процесса сорбции радионуклидов подтверждено экспериментально.

Список литературы

- Долгоносоев А. М. Ионный обмен и ионная хроматография / Долгоносоев А. М., Сенявин М. М., Волошик И. Н. – М.: Наука, 1993. – 221 с.
- Hammel K. E. Depolymerization of a synthetic lignin in vitro by lignin peroxidase / K. E. Hammel, M. A. Moen // *Enzyme Microb. Technol.* – 1991. – V. 13, № 1. – P. 15–18.
- Макроскопическая модель кинетики ионного обмена для многокомпонентных систем / А. М. Долгоносоев, Р. Х. Хамизов, А. Н. Крачак [и др.] // *ДАН.* – 1995. – Т. 342, № 1. – С. 53–57.
- Общий курс процессов и аппаратов химической технологии / [В.Г.Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов и др.]; под ред. В. Г. Айнштейна. – [в 2 кн., кн. 2]. – М.: Логос. Высшая школа, 2002. – 872 с.
- Кинетика сорбции аминокислот на сульфокатионите Ку-2–8 при различных температурах / Д. Л. Котова, Т. А. Крысанова, О. И. Рожнова [и др.] // *Вестник ВГУ. Серия: Химия, Биология, Фармация.* – 2003. – № 2. – С. 35–37.
- Петрашко О.К. Основные процессы химических производств / О.К. Петрашко, В.Н. Григорьева – Севастополь: СНИЯЭ и П, 2002. – 204 с. – (Массообмен: в 2-х частях, часть 2).
- Дытнерский Ю. И. Процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / Дытнерский Ю. И. – М.: Химия, 1995. – 400 с. – (Теоретические основы процессов химической технологии. Гидромеханические и тепловые процессы и аппараты: в 2-х кн., кн. 2).
- Мясоедова Г. В. Сорбционные материалы для извлечения радионуклидов из водных сред / Г. В. Мясоедова, В. А. Никашина // *Журнал Рос. хим. Об-ва им. Д. И. Менделеева.* – 2006. – Т. 1, № 5. – С. 55–63.
- Черкашина Н. И. К вопросу о взаимодействии лигнинов с неорганическими модификаторами при механохимической обработке / Н. И. Черкашина, В. А. Ерофеев // *Сборник научных трудов СНУЯЭ и П.* – 2011. – № 2 (38). – С. 184–189.
- 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; опублик. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
- Пат. 93824 Украины. Технология производства сорбента на основе лигнина / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун-т ядерной энергии и промышленности. – № а 2013 93824; заявл. 10.04.2013; опублик. 12.07.13, Бюл. № 23 (I ч.). – 6 С.
- Черкашина Н.И. Очистка трапных вод и технологических сред первого контура от радионуклидов и нефтепродуктов сорбентами на основе лигнина / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев // *Водоочистка.* – 2011. – № 10. – С. 40–44.
- 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.
- Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев, Е.А., Культенко // *Экологическая безопасность.* – 2013. – № 2 (16). – С. 89–92.
- 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.

16. 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.

References

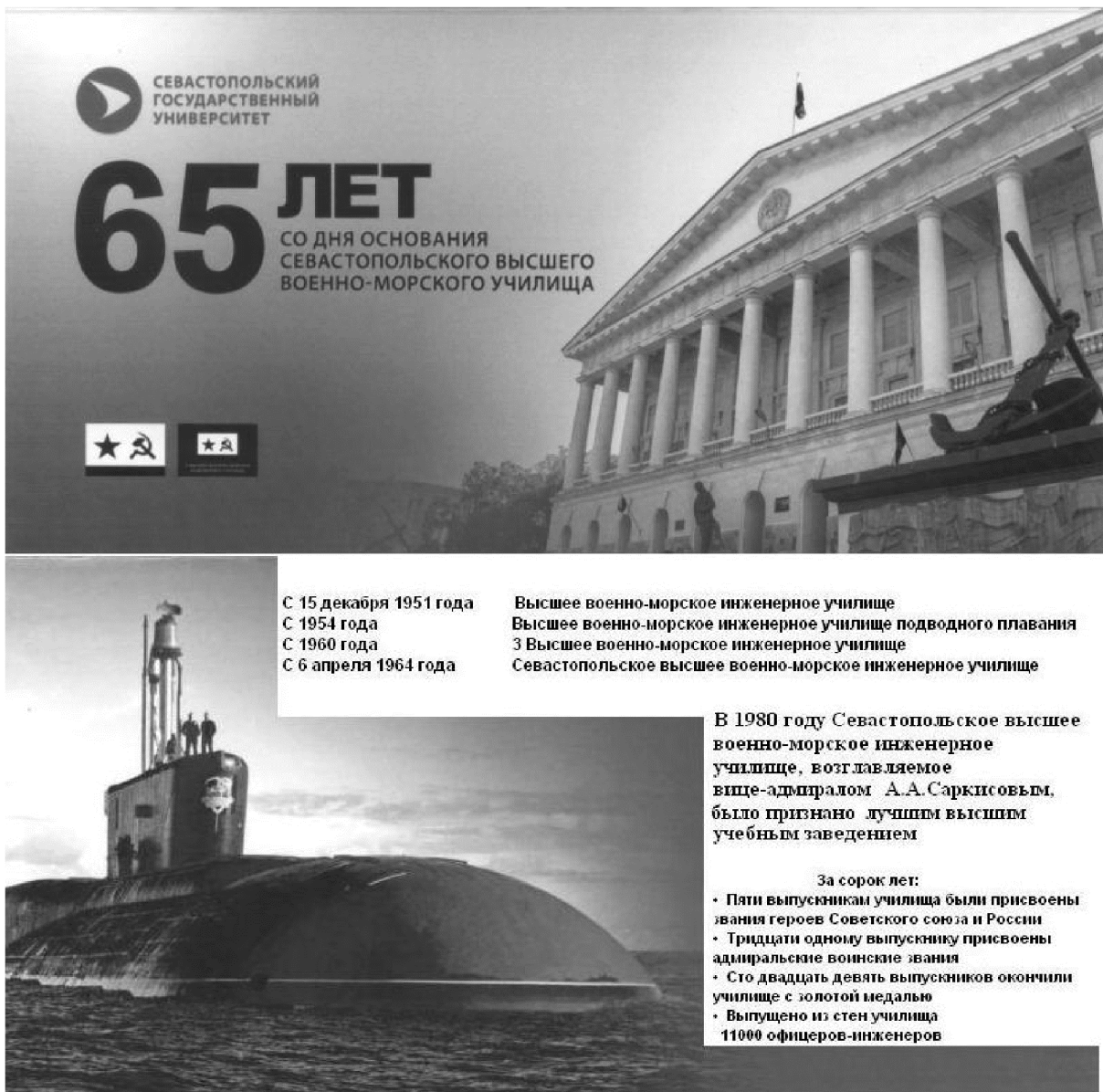
1. Dolgonosov A. M. Ion exchange and ion chromatography / Dolgonosov A. M., Senyavin M. M., In-Losik I. N. – M.: Nauka, 1993. – 221 p.
2. Hammel K. E. Depolymerization of a synthetic lignin in vitro by lignin peroxidase / K. E. Hammel, M. A. Moen // Enzyme Microb. Technol. – 1991. – V. 13, № 1. – P. 15-18.
3. Macroscopic model the kinetics of ion-exchange for multicomponent systems / A. M. Dolgonosov, R. H. Hamidov, A. N. Krecak [etc.], DOKL. – 1995. – Vol. 342, No. 1. – P. 53-57.
4. General course of processes and apparatuses of chemical technology / [V.G. Ainshtein, M. K. Zakharov, G. A. Nosov et al.]; edited by V. G. Einstein. – [in 2 vol., kN. 2]. – M.: Logos. Higher school, 2002. – 872 p.
5. The kinetics of sorption of amino acids on sulphonation-te Ku-2-8 at different temperatures / D. L. Kotov, T. A. Krysanova, Rozhnova O. I. [and others] // Vestnik VSU. Series: Chemistry, Biology, pharmacy. – 2003. – No. 2. – S. 35-37.
6. Petrashko O. K. the Basic processes of chemical productions / K. O. Petrashko, V. N. Grigorieva Sevastopol: SNEE and P, 2002. – 204 S. – (Wt-saabman: in 2 parts, part 2).
7. Dynarski Y. I. Processes and apparatuses of chemical technology: textbook for universities / Dynarski Y. I. – M.: Khimiya, 1995. – 400 S. – (Theoretical bases of processes of chemical technology. Guide-romanijiska and thermal processes and apparatus: B2-x vol., kN. 2).
8. Myasoedova, G. V., Sorption materials for attraction of radionuclides from aquatic environments / G. V. Myasoedova, V. A. Nikashina // ROS. chem. Ob-VA im. D. I. Mendeleev. – 2006. – Vol. L, No. 5. – S. 55-63.
9. Cherkashina N. I., Erofeev V. A. K voprosy o vzaimodeistvii ligninov s neorganicheskimi modifikatorami pri mexanicheskoi obrabotke [To the question about the interaction of lignin with inorganic modifiers to the mechanochemical treatment] Collection of scientific works SNUNE and I P. – 2011. – № 2 (38). – S. 184-189.
10. 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 modificirovannogo 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.
11. Cherkashina N.I., Erofeev V. A. Pat. 93824 Ukraine. Tekhnologija proizvodstva sorbrnta na osnove lignina [The production technology of the sorbent on the basis of lignin]; applicant and patentee of the of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2013 93824; Appl. 10.04.2013;publ. 12.07.13, bull. No. 23 (I h). - P 6.
12. Cherkashina N.I., Erofeev V.A. Ochistka trapnix vod I texnologicheskix sred pervogo kontura ot radionuklidov I nefteproduktov sorbenta na osnove lignina [Cleaning floor drain waters and fluids of the primary circuit from radionuclides and petroleum sorbents based on lignin] Water purification, 2011, Vol. 10, P.40-44.
13. Cherkashina N.I. Tekhnologija 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.
14. Cherkashina N.I., Erofeev V.A, Kulenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pererabotki rastitelnogo sirjz pri ochistke 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.
15. 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 from natural materials based on lignin] New University. Series: Technical Sciences. 2015. No. 11-12 (45-46). S. 51-57.
16. Cherkashina N.I., Vedisheva V.A. Issledovanie effektivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuklidov 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.

Выпускникам, преподавателям, командирам, служащим и членам семей Севастопольского ВВМИУ

ПРИГЛАШЕНИЕ

Дорогие друзья!

На основании «Концепции мероприятий 65-летия Севастопольского ВВМИУ», принятой Советом Союза МООВ ВМФ «Союз выпускников Севастопольского ВВМИУ» и согласованной с Главнокомандующим Военно-морским флотом России адмиралом В.И. Королевым, развернута подготовка мероприятий 65-летия Севастопольского ВВМИУ на всех флотах России, в городах Санкт-Петербурге, Севастополе, Москве, Обнинске. Организационный комитет мероприятий 65-летия СВВМИУ и Совет Союза МООВ ВМФ «Союз выпускников СВВМИУ» приглашает всех выпускников, преподавателей, служащих и членов их семей принять участие мероприятиях юбилея СВВМИУ 16-17 декабря 2016 года в Санкт-Петербурге или в местах их проведения в Москве, Севастополе и Обнинске.



СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

65 ЛЕТ

СО ДНЯ ОСНОВАНИЯ
СЕВАСТОПОЛЬСКОГО ВЫСШЕГО
ВОЕННО-МОРСКОГО УЧИЛИЩА

★ ★

С 15 декабря 1951 года	Высшее военно-морское инженерное училище
С 1954 года	Высшее военно-морское инженерное училище подводного плавания
С 1960 года	3 Высшее военно-морское инженерное училище
С 6 апреля 1964 года	Севастопольское высшее военно-морское инженерное училище

В 1980 году Севастопольское высшее военно-морское инженерное училище, возглавляемое вице-адмиралом А.А. Саркисовым, было признано лучшим высшим учебным заведением

За сорок лет:

- Пяти выпускникам училища были присвоены звания героев Советского союза и России
- Тридцати одному выпускнику присвоены адмиральские воинские звания
- Сто двадцать девять выпускников окончили училище с золотой медалью
- Выпущено из стен училища 11000 офицеров-инженеров

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 2 № 3**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 2 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 sevsu.ru/l.v.litvinova@sevsu.ru
тел. +7(8692) 71-30-44, факс +7(8692) 71-01-38

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 *М.В. Тетаренко*

Подписано к печати 26.12.2016. Изд. № 301/16. Зак. 230/16. Тираж 65 экз.
Объем 13 п.л. Усл. 12,09 п.л. Уч.-изд. л. 12,74. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»