

**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. 3 № 4**

**Севастополь  
2017**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2017. – Т. 3. - № 4. – 164 с.: ил.**

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

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

**Редакционная коллегия:**

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

Учредитель и издатель:

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

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

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

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

---



---

## СОДЕРЖАНИЕ

---



---

|                                                                                                                                                                                                                                                                                |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Тепловые и ядерные энергетические установки</b>                                                                                                                                                                                                                             | <b>7</b>  |
| <i>Браславский Ю.В., Сукрушев А.В., Куприн И.В., Никонов А.С.</i> Анализ особенностей работы системы аварийной защиты ВВЭР-1000 при нарушении теплоотвода во втором контуре                                                                                                    | 7         |
| <i>Браславский Ю.В., Мерзликин Г.Я., Шаповаленко В.В.</i> Зависимость основных эффектов реактивности ВВЭР от состояния активной зоны реактора                                                                                                                                  | 16        |
| <i>Качур С.А.</i> Гравитационные эффекты двойных систем монополей естественных реакторов                                                                                                                                                                                       | 23        |
| <i>Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Журавлев А.А., Глушкова Е.В., Пантель В.О.</i> Акустическая кавитация и ее применение в науке и технике                                                                                                                                     | 29        |
| <i>Шаповаленко В.В., Мерзликин Г.Я., Польшаков С.Ю.</i> Исследование температур в топливных таблетках твэла с учетом изменения теплопроводности уран-гадолиниевого топлива $UO_2+Gd_2O_3$ в зависимости от массового содержания выгорающего поглотителя в топливной композиции | 39        |
| <b>Автоматизация процессов контроля и управления</b>                                                                                                                                                                                                                           | <b>42</b> |
| <i>Быковский Ю.М., Нурзай В.А., Халина А.А.</i> Исследование реакции ПЗС-матрицы на изменение освещённости                                                                                                                                                                     | 42        |
| <i>Качур С.А., Шахова Н.В., Аникевич К.П., Давиденко Е.Н.</i> Идентификация аварийных режимов блоков ядерной энергетической установки на основе статистических и нейросетевых методов                                                                                          | 47        |
| <b>Электротехнические комплексы и системы</b>                                                                                                                                                                                                                                  | <b>55</b> |
| <i>Сафонов В.А., Восканян А.А.</i> Тенденции, состояние, возможностей, перспективы развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Республике Крым и г. Севастополь                                                                                                         | 55        |
| <i>Титаренко О.Н., Куликова Н.А., Чулкин А.А.</i> Автоматизация учета потребления электроэнергии в бытовом секторе как одно из важных направлений энергосбережения в электроэнергетике                                                                                         | 65        |
| <i>Углов А.В., Гусева Е.В., Углова М.Б.</i> Влияние факторов синхронизации на качество переходного процесса при включении синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой                                                                                       | 71        |
| <b>Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии</b>                                                                                                                                                                                                                       | <b>77</b> |
| <i>Кузминов В.В., Шестернёва А.М., Чердаков С.С.</i> Исследование автономной фотоэлектрической установки                                                                                                                                                                       | 77        |
| <i>Шайтор Н.М., Горпинченко А.В., Рясков Ю.И.</i> Плавниковый электродвигательный комплекс аксиально-радиальной конфигурации                                                                                                                                                   | 82        |
| <b>Химические технологии атомных станций</b>                                                                                                                                                                                                                                   | <b>89</b> |
| <i>Гавриш В.М., Шагова Ю.О.</i> Микробиологическое выщелачивание молибденосодержащих отходов                                                                                                                                                                                   | 89        |
| <i>Пономаренко П.А., Фролова М.А., Таборовская Е. П.</i> Способ оператив-                                                                                                                                                                                                      |           |

|                                                                                                                                                                                               |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| ного определения обогащения урана по интенсивности испускания мгновенных гамма – квантов спонтанного деления                                                                                  | 94         |
| <i>Федорова С.А., Гавриш В.М., Гавриш О.П.</i> Использование нанопорошка оксида кремния в качестве керамической матрицы для иммобилизации жидких радиоактивных отходов атомных станций с ВВЭР | 98         |
| <i>Черкашина Н.И.</i> Использование лигниновых препаратов для очистки шахтных вод                                                                                                             | 112        |
| <i>Черкашина Н.И., Литвинова А.О.</i> Определение некоторых характеристик ионитов для очистки жидких технологических сред на примере СВО-5                                                    | 118        |
| <i>Черкашина Н.И., Литвинова А.О.</i> Разработка перспективных комбинаций сорбционных смесей для системы СВО-5                                                                                | 124        |
| <i>Широков И.Б., Марончук И.И.</i> Методы определения водосодержания в нефти и нефтепродуктах, остаточного содержания нефтепродуктов в воде                                                   | 130        |
| <b>Экологическая безопасность</b>                                                                                                                                                             | <b>146</b> |
| <i>Дербасова Н.М.</i> Мониторинг загрязнения почвы химическими элементами территории РДКС «Чайка»                                                                                             | 146        |
| <i>Морозова Н.В., Урикова Н.В., Емец Е.А.</i> Современные угрозы климатических и экологических изменений, связанные с энергетической деятельностью человека                                   | 152        |

---



---

## CONTENTS

---



---

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Thermal and nuclear power plant</b>                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>7</b>  |
| <i>Braslavskiy Yu.V., Sukrushev A.V., Kuprin I.V., Nikonov A.S.</i> Analysis of the WWER-1000 safety system operation peculiarities in case of secondary circuit heat removing failure                                                                                                         | 7         |
| <i>Braslavskiy Yu.V., Merzlikin G.Ya., Shapovalenko V.V.</i> Main WWER reactivity effects dependence on reactor core conditions                                                                                                                                                                | 16        |
| <i>Kachur S.A.</i> Gravitation Effects of Double Systems of Monopole of Natural Reactors                                                                                                                                                                                                       | 23        |
| <i>Pukhliy V.A., Miroshnichenko S.T., Zhuravlev A.A., Glushkova E.V., Pantel V.O.</i> Acoustic cavitation and its application in science and technician                                                                                                                                        | 29        |
| <i>Shapovalenko V., Merzlikin G., Polshakov S.</i> Study the temperatures in the fuel tablets of the fuel rod taking into account changes in the thermal conductivity of uranium-gadolinium fuel $UO_2+Gd_2O_3$ depending on the mass content of the burnable absorber in the fuel composition | 39        |
| <b>Process automation and control</b>                                                                                                                                                                                                                                                          | <b>42</b> |
| <i>Bykovsky Yu.M., Nurzai V.A., Halina A.A.</i> Research of CCD-matrix response to illuminance change                                                                                                                                                                                          | 42        |
| <i>Kachur S.A., Shahova N.V., Anikevich K.P., Davidenko E.N.</i> Authentication of Malfunctions of Blocks of Nuclear Power Installation on the Basis of Statistical and Neuronet Methods                                                                                                       | 47        |
| <b>Electrotechnical complexes and systems</b>                                                                                                                                                                                                                                                  | <b>55</b> |
| <i>Safonov V. A., Voskanyan A. A.</i> Trends, status, opportunities, perspectives of development in obnovlennyh energy sources (V) in the Republic of Crimea and Sevastopol.                                                                                                                   | 55        |
| <i>Titarenko O.N., Kulikova N.A., Chuklin A.A.</i> Automation of electricity consumption measurement in the domestic sector as one of the important areas of energy saving in the power industry                                                                                               | 65        |
| <i>Uglov A.V., Guseva E.V., Uglova M.B.</i> Synchronization factors influence on the transitional process quality of synchronous generator powering on parallel work with powerful network                                                                                                     | 71        |
| <b>Alternative and renewable energy sources</b>                                                                                                                                                                                                                                                | <b>77</b> |
| <i>Kuvshinov V.V., Shesterniova A.M., Cherdakov S.S.</i> Study of an autonomous photovoltaic system                                                                                                                                                                                            | 77        |
| <i>Shaytor N.M., Gorpinchenko A.V., Rjaskoff Y.I.</i> Fin electropulsion complex axial-radial configuration                                                                                                                                                                                    | 82        |
| <b>Chemical technology of nuclear power plants</b>                                                                                                                                                                                                                                             | <b>89</b> |
| <i>Gavrish V.M., Shagova J.O.</i> Microbiological leaching of molybdenum-containing waste                                                                                                                                                                                                      | 89        |
| <i>Ponomsrenko P.A., Frolova M.A., Taborovskaya E.P.</i> The method of prompt                                                                                                                                                                                                                  |           |

|                                                                                                                                                                                               |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| determination of uranium enrichment intensity of the emission of instant gamma unprompted fission                                                                                             | 94         |
| <i>Fedorova S.A., Gavrish V.M., Gavris O.P.</i> The use of silicon oxide nanopowder as a ceramic matrix for the immobilization of liquid radioactive waste from nuclear power plants with PWR | 98         |
| <i>Cherkashina N.I.</i> Use ligninov drugs for the purification of mine waters                                                                                                                | 112        |
| <i>Cherkashina N.I., Litvinova A. O.</i> Determination of some characteristics of ion exchangers for purification of liquid technological environments on the example of the SVO-5            | 118        |
| <i>Cherkashina N.I., Litvinova A. O.</i> The development of promising combination of sorption of mixtures for the system of swo-5                                                             | 124        |
| <i>Shirokov I. B., Maronchuk I. I.</i> Methods for determining water content in oil and petroleum products, residual content of oil products in water                                         | 130        |
| <b>Environmental safety</b>                                                                                                                                                                   | <b>146</b> |
| <i>Derbasova N.M.</i> Monitoring of contamination of soil chemical elements territories of RCCS "Seagull"                                                                                     | 146        |
| <i>Morozova N.V., Urikova N.B., Yemetz E.A.</i> Modern threats of climatic and ecological safety                                                                                              | 152        |

---

**ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ**

---

УДК.621.039.586

**Анализ особенностей работы системы аварийной защиты ВВЭР-1000 при нарушении теплоотвода во втором контуре**Ю.В. Браславский<sup>1</sup>, А.В. Сукрушев<sup>2</sup>, И.В. Куприн<sup>3</sup>, А.С. Никонов<sup>4</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,

г. Севастополь, 299053, Россия. <sup>1</sup>a1a67@yandex.ru,sukrushev1952@yandex.ru, <sup>3</sup>nikomunedanoznat@mail.ru, <sup>4</sup>kuprin@gmail.ru

Статья поступила 30.09.2017 г.; после доработки 01.11.2017 г.

---

**Аннотация**

При возникновении аварийной ситуации предусмотрена система аварийной защиты реактора, срабатывание которой вызывает падение органов регулирования в активную зону. Одной из важнейших характеристик реактора, по которой можно судить об уровне безопасности активной зоны, является эффективность аварийной защиты. В статье выполнено исследование особенностей работы системы аварийной защиты ВВЭР-1000 при различных состояниях активной зоны реактора. Рассматривается аварийная ситуация, схожая с аварией на АЭС «Три Майл Айленд», при множественных отказах оборудования первого и второго контура. Приводится алгоритм действий оператора, позволяющий избежать плавления активной зоны реактора и стабилизировать параметры ядерной установки. Исследуется надежное обеспечение безопасности защитных барьеров реактора при совпадении нескольких отказов оборудования первого и второго контура.

**Ключевые слова:** аварийная защита, водо-водяной реактор, активная зона, барьеры безопасности, орган регулирования, топливная загрузка.

---

**Analysis of the WWER-1000 safety system operation peculiarities in case of secondary circuit heat removing failure**Yu.V. Braslavskiy<sup>1</sup>, A.V. Sukrushev<sup>2</sup>, I.V. Kuprin<sup>3</sup>, A.S. Nikonov<sup>4</sup>

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,

Sevastopol, 299053, Russia. <sup>1</sup>a1a67@yandex.ru,sukrushev1952@yandex.ru, <sup>3</sup>nikomunedanoznat@mail.ru, <sup>4</sup>kuprin97@mail.ru

Received 30.09.2017 y.; received in final form 01.11.2017 y.

---

**Abstract**

If emergency situation happens, reactor safety system operates and it causes control elements drop into the core. One of the most important reactor characteristics with the help of which we can estimate the reactor core level of safety is the efficiency of the safety system. Furthermore, emergency situations can be caused by several failures which happened simultaneously. WWER-1000 safety system peculiarities in case of different reactor core conditions are examined. Emergency situation similar to "Three Mile Island" one in case of multiple failures of the primary and secondary circuit is analyzed. Operator's plan of action which give chance to avoid reactor core melt and stabilize nuclear installation parameters is given. Reliable ensuring of the reactor protective barriers safety in case of several simultaneous equipment failure of the primary and secondary circuit are examined.

**Keywords:** reactor safety system, pressurized water reactor, reactor core, protective barriers, regulating unit, fuel element column.

---

## Введение

Основной составляющей системы управления и защиты реактора (СУЗ) для обеспечения безопасности ВВЭР и всей ЯЭУ в целом является система аварийной защиты (АЗ). АЗ формирует команду на падение органов регулирования (ОР) при возникновении аварийной ситуации. Органы регулирования выполнены таким образом, что штанга с поглотителем удерживается в верхнем (или промежуточном) положении при помощи электромагнитов. При обесточивании электромагнита ОР падают вниз независимо от положения по высоте зоны. Для повышения надежности системы предусмотрены два комплекта аппаратуры АЗ. Каждый комплект аппаратуры выполнен трехканальным, функционирует по мажоритарному принципу «два из трех» и является полностью независимым. На каждый комплект аппаратуры АЗ входные сигналы поступают от трех комплектов датчиков аварийных сигналов, пройдя необходимую обработку в устройстве формирования дискретных сигналов [1].

Одной из важнейших характеристик реактора, по которой можно судить об уровне безопасности активной зоны, является «вес» аварийной защиты. Поскольку «вес» аварийной защиты существенно зависит от конфигурации нейтронных полей в объеме активной зоны, то для каждой топливной загрузки желательно знать эту характеристику в зависимости от мощности и момента кампании. Однако измерения на АЭС регулярно проводятся, в основном, на минимально-контролируемом уровне мощности (МКУ) при каждом пуске энергоблока после перегрузки топлива. Этих измерений вполне достаточно для ВВЭР-1000 по двум причинам.

Во-первых, при увеличении мощности и выгорания топлива эффективность аварийной защиты возрастает. Происходит это, в основном, потому, что в конце кампании в воде практически нет борной кислоты, доступ тепловых нейтронов к поглотителю увеличивается и повышается эффективность АЗ. Особенно это проявляется в тех случаях, когда распределение потока нейтронов по радиусу активной зоны изменяется незначительно в зависимости от времени выгорания топлива. Если сравнивать разные топливные загрузки между собой, то может оказаться, что распределение нейтронов на начало кампании одной загрузки существенно уплощается для другой загрузки на конец кампании, и это может привести к обратному

результату – уменьшение «ценности» нейтронов в области расположения ОР СУЗ уменьшает эффективность ОР СУЗ, тем более, что нейтронное поле выталкивается на периферию активной зоны при вводе ОР СУЗ.

Во-вторых, при срабатывании аварийной защиты реактор в течение нескольких секунд переводится на МКУ, что обуславливает необходимость знания эффективности ОР СУЗ именно в этом состоянии [2].

Также следует учитывать, что аварийная ситуация на энергоблоке может быть вызвана не одним отказом, а несколькими одновременно (такая авария называется запроектной). Кроме того, тип топливной загрузки оказывает существенное влияние на эффективность аварийной защиты.

## Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение особенностей работы системы аварийной защиты ВВЭР-1000 при различных состояниях активной зоны реактора в случае возникновения аварийной ситуации при множественных отказах оборудования первого и второго контура. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- используя компьютерную модель ядерной установки, сформировать различные варианты загрузки реактора ВВЭР-1000;
- инициировать аварийную ситуацию с нарушением теплоотвода во втором контуре и застреванием наиболее ценных органов регулирования при срабатывании аварийной защиты;
- сопоставить поведение основных параметров ЯЭУ по времени при срабатывании аварийной защиты для различных типов топливных загрузок;
- проверить надежное обеспечение безопасности защитных барьеров реактора при совпадении перечисленных отказов.

## Формирование топливных загрузок ВВЭР-1000

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 действующих ядерных энергетических установках.

Первоначально были сформированы следующие варианты активной зоны ВВЭР-1000 (прототип 3-й блок Калининской АЭС):

- пусковая (первая) загрузка на начало кампании;
- стационарная загрузка на 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. 1).

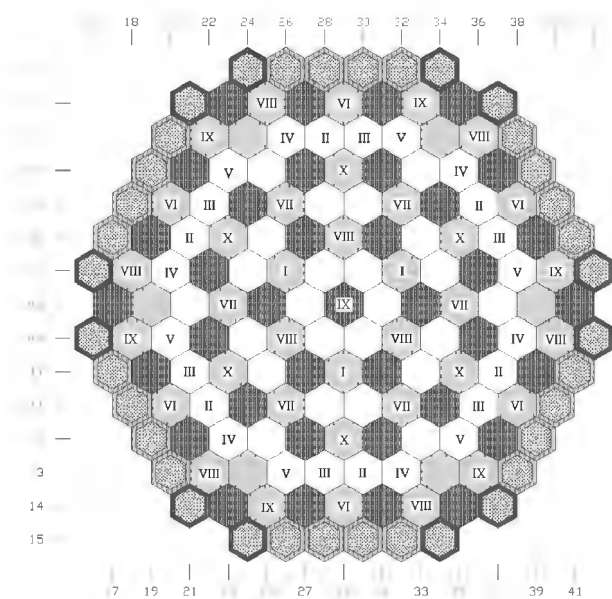


Рис. 1. Расположение ОР СУЗ топливной загрузки 3-го блока Калининской АЭС.

Также для имитации заданных условий аварийной ситуации были определены два наиболее ценных органа регулирования. Для этого использовалась зависимость (1), полученная в работах [2, 3] и показывающая, что вес одиночного органа регулирования определяется, в основном, по относительной доле числа делений в ТВС, из которой он был извлечен, а также по изменению размножающих свойств в данной ТВС.

$$\rho_{эфф} = \frac{\int Q_0 Q_c \left( \frac{1}{K_{\infty}^0} - \frac{1}{K_{\infty}^c} \right) dV}{\int Q_0 Q_c \frac{dV}{\nu \Sigma_f}}, \quad (1)$$

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

$Q_c$  – распределение числа делений по объему зоны при всех ОР на нижних концевых выключателях;

$K_{eff0}$  – эффективный коэффициент размножения при всех ОР на нижних концевых выключателях;

$K_{\infty}^c$  – эффективный коэффициент размножения бесконечной решетки в ТВС с ОР СУЗ;

$K_{\infty}^0$  – эффективный коэффициент размножения бесконечной решетки в ТВС без ОР СУЗ.

### Анализ работы аварийной защиты при различных топливных загрузках

Для изучения процессов, происходящих в ЯЭУ, рассматривалось срабатывание аварийной защиты реактора в случае совпадения следующих отказов:

- отключение всех питательных насосов парогенераторов (основных и аварийных);
- отсечение парогенераторов (ПГ) от главного парового коллектора помощью ложного закрытия быстродействующего клапана (БЗОК);
- отказ ускоренной предупредительной защиты реактора (УПЗ);
- застревание двух наиболее «ценных» ОР СУЗ над активной зоной при падении органов регулирования по сигналу аварийной защиты реактора.

Рассмотрение вышеуказанных отказов проводилось с целью имитации условий, предшествующих аварии на американской АЭС «Three Miles Island» и демонстрации правильных действий персонала, не приводящих к тяжелым по-

следствиям, случившимся на данной АЭС (расплавление активной зоны реактора).

Исследования выполнялись для начала кампании пусковой топливной загрузки и конца кампании стационарной топливной загрузки ВВЭР-1000.

После отключения основных и аварийных питательных насосов ПГ отключается турбина, что вызывает рост давления пара в главном паровом коллекторе (ГПК) до срабатывания паросбросных устройств 2-го контура (БРУ-К и БРУ-А) (рис. 2).

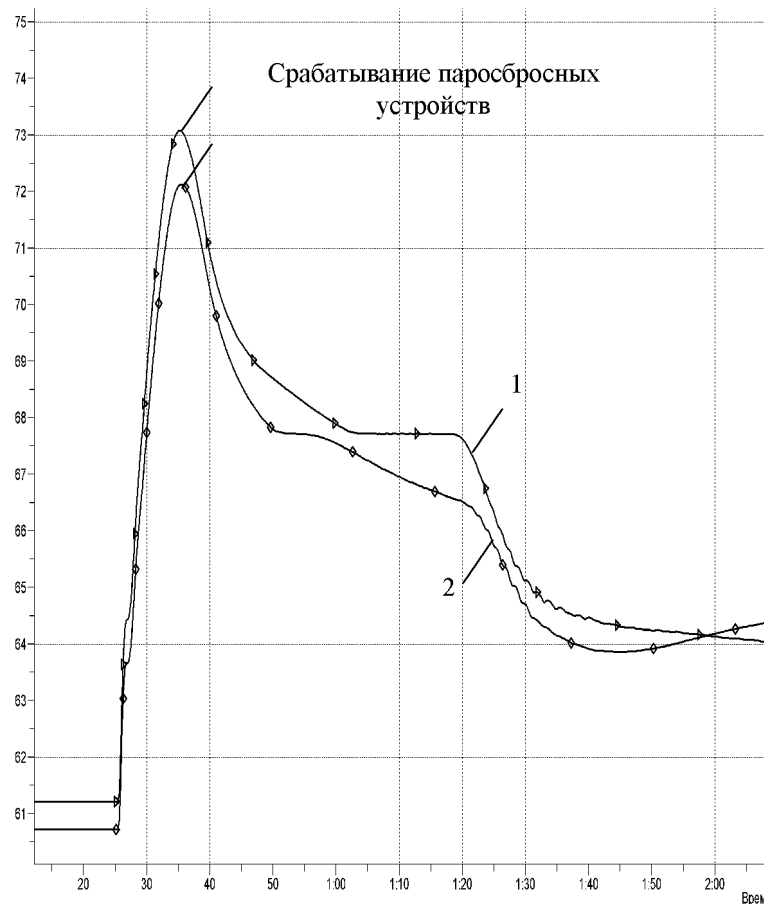


**Рис. 2.** Давление пара в ГПК:

1 – начало кампании пусковой загрузки;

2 – конец кампании стационарной загрузки

По факту отключения турбины должна срабатывать УПЗ, вызывающая падение одной группы ОР СУЗ в активную зону, а затем устройство разгрузки и ограничения мощности реактора (РОМ) обеспечивает доразгрузку реактора до 40% от номинальной мощности. Однако, учитывая, что ускоренная предупредительная защита для реакторов АЭС «Three Miles Island» не была предусмотрена, имитируется отказ УПЗ, т.е. первоначальное снижение мощности реактора выполняется только устройством РОМ (рис. 3).

Прекращение подачи питательной воды в ПГ обуславливает снижение уровня в них котловой воды, и когда эта величина падает до нижнего предела (1750 мм), отключается главный циркуляционный насос (ГЦН) данной петли 1-го контура для замедления выкипания па-

рогенератора (рис. 4).

Поскольку уровень снижается во всех ПГ, отключаются все четыре ГЦН, что вызывает срабатывание аварийной защиты реактора и падение всех ОР СУЗ в активную зону (кроме двух, имеющих наибольший «вес»). Нейтронная мощность обнуляется, тепловая мощность снижается до уровня остаточных тепловыделений, в 1-м контуре ЯЭУ возникает естественная циркуляция теплоносителя. При снижении расхода теплоносителя давление в 1-ом контуре начинает возрастать из-за увеличения подогрева теплоносителя в активной зоне. При повышении температуры теплоносителя гидравлическое сопротивление в зоне и первом контуре растет, и расход начинает падать до 200...300 кг/сек.

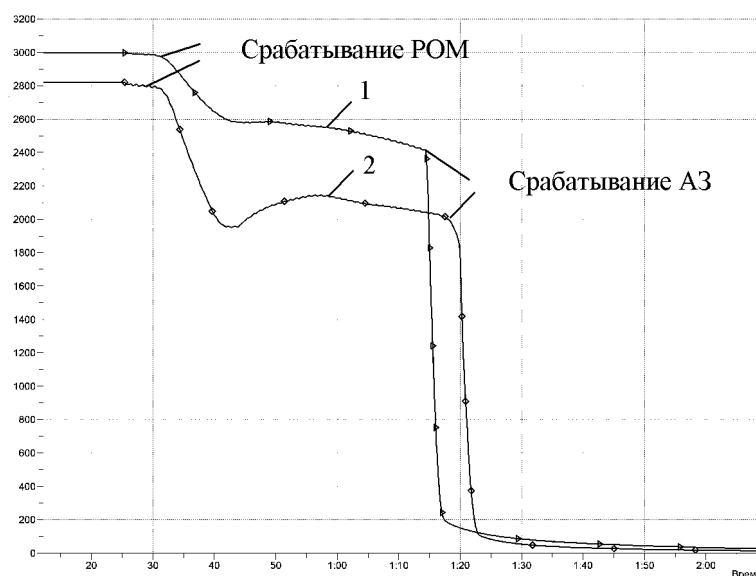


**Рис. 3.** Тепловая мощность реактора:  
1 — начало кампании пусковой загрузки;  
2 — конец кампании стационарной загрузки

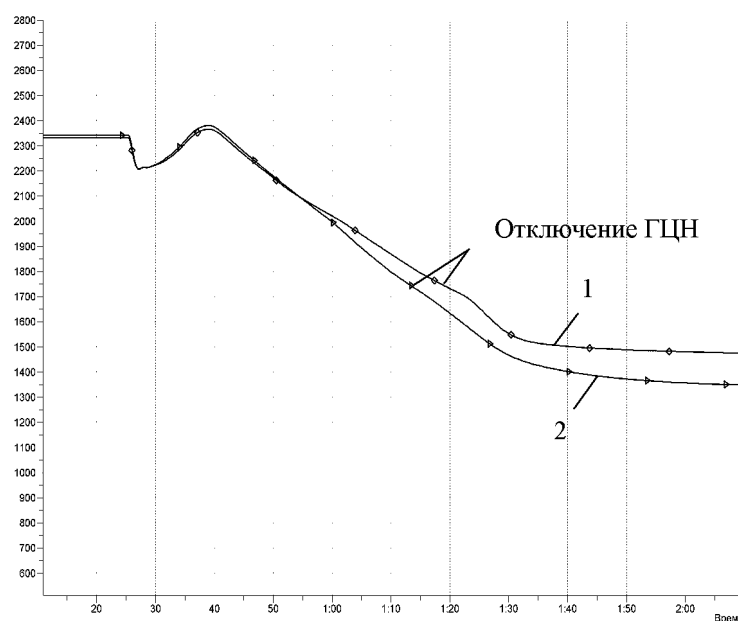


**Рис 4.** Уровень в ПГ:  
1 — начало кампании пусковой загрузки;  
2 —конец кампании стационарной загрузки

Т.к. остаточное энерговыделение в начале кампании пусковой загрузки невелико и продолжает уменьшаться, подогрев в зоне и основные параметры ЯЭУ: давления 1-го и 2-го контуров, уровни в ПГ, стабилизируются. Тепло от 1-го контура отводится через ПГ и БРУ-К в главный конденсатор. Насосы САОЗ высокого давления включаются в работу по причине снижения давления в 1-м контуре. Из них работают только насосы объемного типа (способные подавать воду в контур при номинальном давлении в

нем) и подают небольшой расход в реактор. Другие насосы с большой подачей работают по линии рециркуляции, т.к. они переходят на первый контур при снижении давления в реакторе ниже  $110 \text{ кгс/см}^2$ , чего не происходит для данного состояния активной зоны.

При проведении аналогичного эксперимента для конца кампании стационарной загрузки процессы, происходящие в ЯЭУ, выглядели несколько иначе.

Прежде всего, существенное влияние на

состояние установки оказывают остаточные тепловыделения, величина которых намного больше, чем в случае пусковой загрузки. Этот фактор обуславливает более интенсивный подогрев теплоносителя после срабатывания АЗ реактора, и, как следствие, повышение давления в 1-м контуре, вплоть до срабатывания импульс-

но-предохранительных устройств компенсатора давления (ИПУ КД). Открытие этих клапанов вызывает снижение давления в контуре, после чего ИПУ закрываются. Однако для большего сходства с аварией на АЭС «Three Miles Island» одно ИПУ не закрылось, т.е. образовалась течь первого контура (рис. 5).

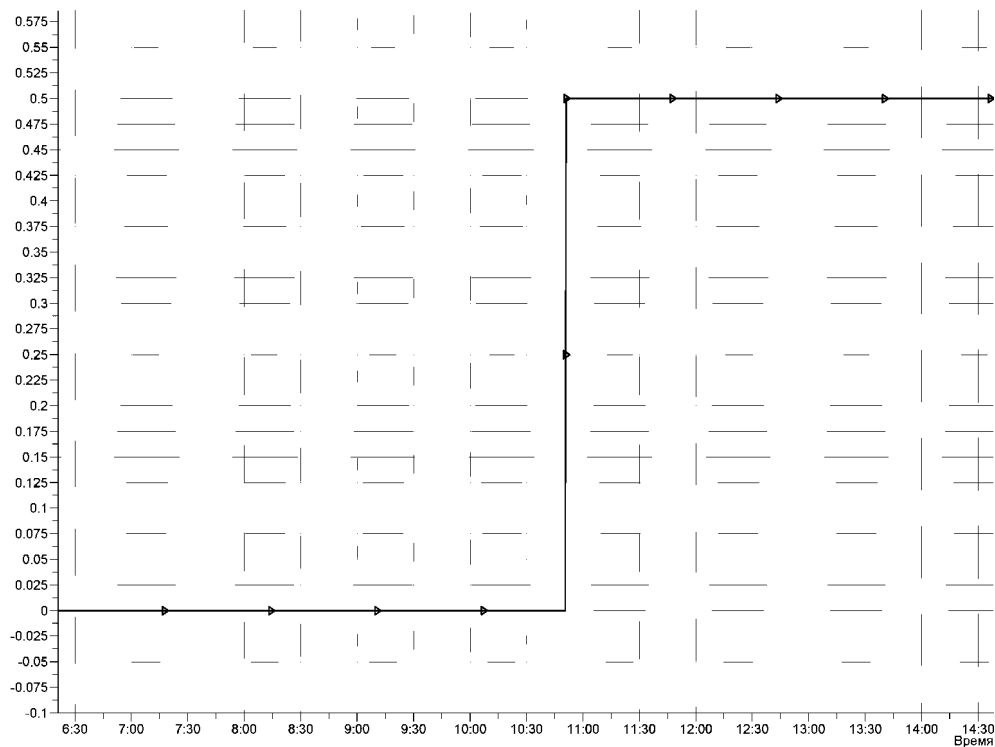


Рис 5. Степень открытия ИПУ КД

Таким образом, исследуемые аварийные ситуации приводят к срабатыванию аварийной защиты и снижению тепловой мощности реактора до уровня остаточных тепловыделений даже при условии застревания двух наиболее «ценных» ОР СУЗ над активной зоной.

Срабатывание АЗ для конца кампании стационарной загрузки происходит несколько позже, чем для начала кампании пусковой загрузки, т.к. уровень мощности в конце кампании ниже, и выкипание ПГ происходит медленнее. При этом в конце кампании стационарной топливной загрузки происходит повышение давления в 1-м контуре до срабатывания ИПУ КД, обусловленное существенным подогревом теплоносителя из-за большего, чем для пусковой загрузки, остаточного энерговыделения.

#### Проверка обеспечения безопасности защитных барьеров реактора

Первоначально были устранены послед-

ствия аварийных ситуаций для обоих вариантов исследований. Для этого через 30 мин. после возникновения аварии были включены питательные насосы ПГ, т.е. восстановлен теплообмен со стороны 2-го контура. Это вызвало увеличение уровня и уменьшение давления в ПГ, а также снижение давления в 1-м контуре вследствие снижения температуры теплоносителя.

После достижения номинального уровня воды в ПГ (2300мм) были подключены ГЦН 1-го контура и отключены работающие насосы САОЗ высокого давления. Для первого варианта исследований (пусковой загрузки) этого оказалось достаточно для стабилизации параметров ЯЭУ и перевода энергоблока в «горячее» состояние.

Для второго варианта исследований (стационарной загрузки) потребовалось выполнение дополнительных операций. В первую очередь, это обусловлено срабатыванием ИПУ КД и последующим отказом одного из

них. Образовавшаяся в результате течь первого контура привела к снижению давления в нем ниже величины, при которой насосы САОЗ с большой подачей переходят на первый контур ( $110 \text{ кгс/см}^2$ ). Устранение отказа ИПУ вызвало к рост уровня в компенсаторе давления. Для предотвращения переполнения КД после увеличения давления в контуре до  $125 \text{ кгс/см}^2$  и прекращения подачи насосов САОЗ воды в первый контура была введена в работу система подпитки-продувки. Изменением соотношения расходов подпитки и продувки первого контура было вызвано сначала снижение уровня в КД до 600 см (что соответствует «горячему» состоянию ЯЭУ), а затем стабилизация уровня на указанной вели-

чине. В конечном итоге, для обоих вариантов исследования было достигнуто «горячее» состояние ЯЭУ и определены основные параметры, характеризующие целостность защитных барьеров реактора:

- температура наружной поверхности оболочки ТВЭЛ – характеризует состояние основного параметра безопасности (рис. 6). При температуре оболочки более  $350^\circ\text{C}$  начинается поверхностное кипение теплоносителя, что приводит к окислению оболочек ТВЭЛ, при температуре более  $450^\circ\text{C}$  начинается уже более интенсивное окисление циркония, при  $700^\circ\text{C}$  начинается пароциркониевая реакция, интенсивность которой значительно возрастает при  $1000^\circ\text{C}$ :

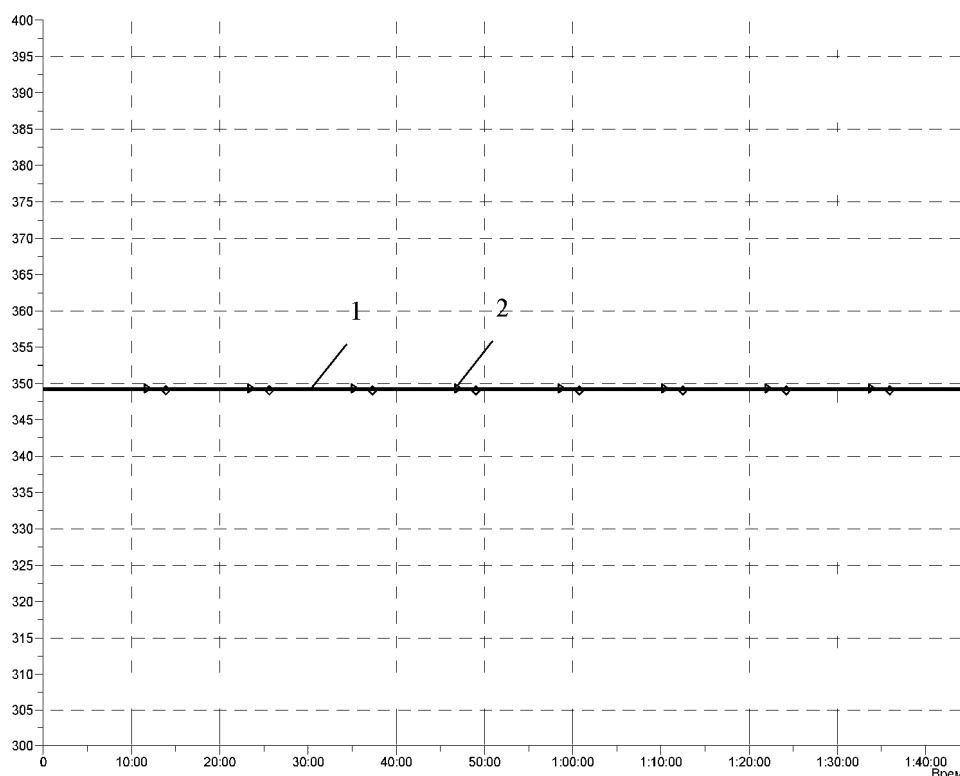
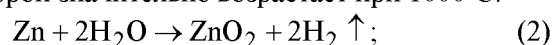


**Рис. 6.** Максимальная температура оболочки ТВЭЛ:

1 – начало кампании пусковой загрузки; 2 – конец кампании стационарной загрузки

- температура топлива в топливной таблетке – характеризует теплофизическое и термомеханическое состояние топлива (рис. 7).

При температуре топлива  $2200...2500^\circ\text{C}$  начинается изменение структуры двуоксида урана, а при температуре более  $2800^\circ\text{C}$  (для облученного топлива) или  $3000^\circ\text{C}$  (для свежего топлива) начинается плавление топливной таблетки;

- коэффициент запаса до кризиса теплообмена DNBR, определяющий запас до кризиса тепло-

обмена на поверхности оболочки ТВЭЛ (рис. 8). DNBR должен быть больше единицы.

$$\text{DNBR} = \frac{q_{\text{крит}}}{q_{\text{max}}}, \quad (3)$$

где  $q_{\text{крит}}$  – критический тепловой поток;

$q_{\text{max}}$  – максимальный тепловой поток;

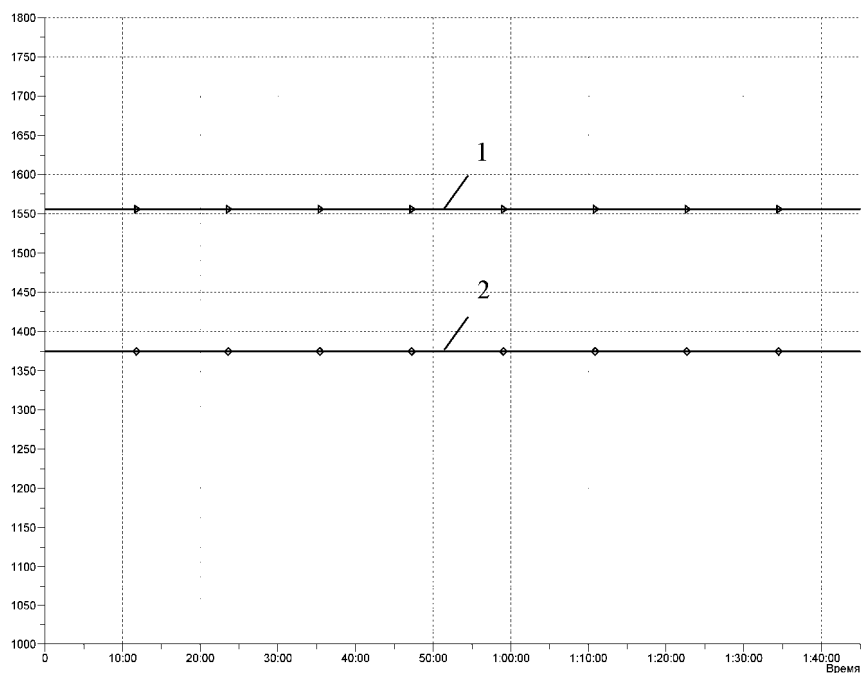


**Рис. 7.** Максимальная температура топлива:  
1 – начало кампании пусковой загрузки;  
2 – конец кампании стационарной загрузки

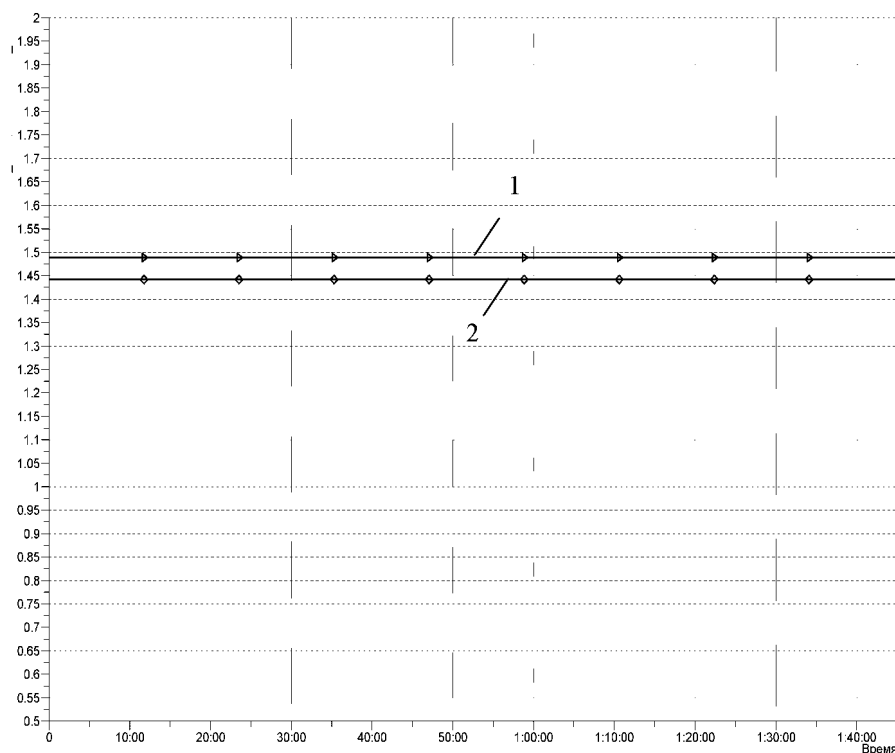


**Рис. 8.** Минимальный коэффициент запаса до кризиса теплообмена:  
1 – начало кампании пусковой загрузки;  
2 – конец кампании стационарной загрузки

Таким образом, срабатывание аварийной защиты реактора и следующие за этим действия оператора обеспечивают целостность

защитных барьеров реактора даже в случае за-  
проектной аварии, обусловленной нарушением  
теплоотвода во 2-м контуре с одновременным

застреванием наиболее ценных ОР СУЗ над активной зоной.

### Заключение

Проведенные исследования особенностей работы системы аварийной защиты ВВЭР-1000 при различных состояниях активной зоны реактора в случае возникновения аварийной ситуации при множественных отказах оборудования первого и второго контура показали следующие результаты:

- исследуемые аварийные ситуации приводят к срабатыванию аварийной защиты и снижению тепловой мощности реактора до уровня остаточных тепловыделений даже при условии застревания двух наиболее «ценных» ОР СУЗ над активной зоной. При этом в конце кампании стационарной топливной загрузки происходит повышение давления в 1-м контуре до срабатывания ИПУ КД, обусловленное существенным подогревом теплоносителя из-за большего, чем для пусковой загрузки, остаточного энерговыделения;
- срабатывание аварийной защиты реактора и следующие за этим действия оператора обеспечивают целостность защитных барьеров реактора даже в случае запроектной аварии, обусловленной нарушением теплоотвода во 2-м контуре с одновременным застреванием наиболее ценных ОР СУЗ над активной зоной.

### Список литературы

1. 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.
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. Браславский Ю.В. Исследование влияния конструкции и состояния активной зоны реактора на достижение повторной критичности / Ю.В. Браславский, К.Б. Матузаев, М.А. Тригуб // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №3. – С. 5 – 10.

### References

1. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Chernov E.V. *Bezopasnost i zadachi inzhenernoy podderzhki ek-*

*spluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [Safety and issues of the WVER nuclear installation operation engineer assistance]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2013, 304 p.

2. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek. *Fizicheskie i konstruktivnyye osobennosti yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [WVER nuclear installations physical and specific design features]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2011, 376 p.
3. Braslavskiy Yu.V., Matuzayev K.B., Trigub M.A. Research of the Reactor Core Construction and Condition Impact on the Recriticality Attainment. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* [Energy installations and technologies]. Sevastopol', FAEI HE STU Publ., 2016, Vol. 2, No 3, pp.5-10.

УДК.621.039.586

## Зависимость основных эффектов реактивности ВВЭР от состояния активной зоны реактора

Ю.В. Браславский<sup>1</sup>, Г.Я. Мерзликин<sup>2</sup>, В.В. Шаповаленко<sup>3</sup>ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,  
г. Севастополь, 299053, Россия.<sup>1</sup>a1a67@yandex.ru, <sup>2</sup>merzlikin@Gmail.ru, <sup>3</sup>shapovalenkovita@rambler.ru

Статья поступила 09.11.2017 г.; после доработки 13.11.2017 г.

### Аннотация

Эффекты реактивности играют определяющую роль в обеспечении безопасной эксплуатации ВВЭР. Знание величины и механизма влияния эффектов реактивности на динамику реактора упрощает его управление. В статье исследованы особенности основных статических характеристик активной зоны ВВЭР-1000, определяющих поведение реактора на стационарных режимах и во время медленных переходных процессов. Определены зависимости величин основных эффектов реактивности от особенностей топливной загрузки и момента кампании, а также от условий их определения.

**Ключевые слова:** водо-водяной реактор, активная зона, эффект реактивности, топливная загрузка.

## Main WWER reactivity effects dependence on reactor core conditions

Yu.V. Braslavskiy<sup>1</sup>, G.Ya.Merzlikin<sup>2</sup>, V.V.Shapovalenko<sup>3</sup>FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,  
Sevastopol, 299053, Russia.<sup>1</sup>a1a67@yandex.ru, <sup>2</sup>merzlikin@Gmail.ru, <sup>3</sup>shapovalenkovita@rambler.ru

Received 09.11.2017 y.; received in final form 13.11.2017 y.

### Abstract

Reactivity effect is instrumental in WWER safety precautions. Knowledge of value and mechanism of reactivity effects over the reactor dynamics makes the reactor control easier. Peculiarities of the WWER-1000 core static characteristic which determine reactor behavior in case of static conditions and during the slow transient processes are examined. Dependence of the main reactivity effects values on the peculiarities of the fuel element column, campaign period and on the conditions of their specifying is determined.

**Keywords:** pressurized water reactor, reactor core, reactivity effect, fuel element column.

### Введение

Для безопасной эксплуатации реакторной установки необходимо знать динамические и статические характеристики самого реактора. Основными характеристиками реактора являются различные эффекты реактивности, определяющие в совокупности баланс нейтронов в системе. При нахождении реактора в критическом состоянии сумма всех эффектов равна нулю. В то же время, важно иметь представление о величине каждого из эффектов реактивности и

о том, за какое время он проявляется. Для оперативного управления (в течение секунд или минут) особое значение имеют температурный и мощностной эффекты реактивности, а также эффективности регулирующих групп органов регулирования системы управления и защиты (ОР СУЗ) реактора. Кроме указанных эффектов на управление реактором существенно влияет эффект ксенонового отравления, что особенно важно при пуске энергоблока и для продления топливного цикла за счет мощностного эффекта реактивности [1].

Как правило, на действующих АЭС измерения основных коэффициентов реактивности (плотностного, температурного, барометрического) осуществляется в период пуска при нахождении энергоблока на минимально-контролируемом уровне мощности (МКУ). Измерения проводятся при различных положениях регулирующих групп ОР СУЗ. Результаты измерений позволяют получить представление о максимальных температурных и минимальных плотностных коэффициентах реактивности для данной топливной загрузки в течение всей кампании [2].

Измерения коэффициентов реактивности на номинальной мощности реактора связаны с некоторыми трудностями. Например, при мгновенном вводе всех ОР СУЗ в активную зону (при срабатывании аварийной защиты) теплофизические параметры в зоне в первый момент времени остаются неизменными. Поэтому эффективность аварийной защиты (АЗ) на мощности в первую секунду можно определить с достаточной точностью только при помощи нейтронно-физического расчета при отключении расчетного модуля теплогидравлики активной зоны. Такое рассмотрение довольно точно, но для реальной ЯЭУ измерить указанные выше величины затруднительно, поэтому необходимо применение расчетных моделей, имеющих достаточную надежность технических решений.

#### Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение особенностей основных статических характеристик активной зоны, определяющих поведение реактора на стационарных режимах и во время медленных переходных процессов длительностью от десятка минут до суток. Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- используя компьютерную модель ядерной установки, сформировать различные варианты топливной загрузки ВВЭР-1000 (пусковую и стационарную);
- определить величины основных эффектов реактивности: температурного, мощностного, эффекта отравления активной зоны ксеноном и самарием, эффекта отравления зоны шлаками из продуктов деления, а также эффекта реактивности при вводе ОР СУЗ в активную зону реактора;
- исследовать зависимости величины указанных эффектов от особенностей топливной

загрузки и момента кампании, а также от условий их определения.

#### Формирование топливных загрузок

Для проведения исследований использовалась учебно-научная лаборатория «Реакторная физика, управление и безопасная эксплуатация ЯЭУ», разработанная коллективом НИЯУ «Московский инженерно-физический институт» с применением расчетного программного комплекса «ПРОСТОР», аттестованным в надзорных органах Российской Федерации и предназначенным для повышения надежности технических решений, полученных на основе расчетов с помощью штатных программ. 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 действующих ядерных энергетических установках.

Были сформированы два типа загрузок:

- пусковая топливная загрузка, состоящая из ТВС с разным обогащением топлива по урану-235 (использовались обогащения 1,3, 2,2 и 4%), но без его выгорания, и средним обогащением топлива порядка 2,4%;
- стационарная топливная загрузка, состоящая из ТВС примерно одного обогащения, равного величине порядка 4,4...4,8% с разной глубиной выгорания топлива.

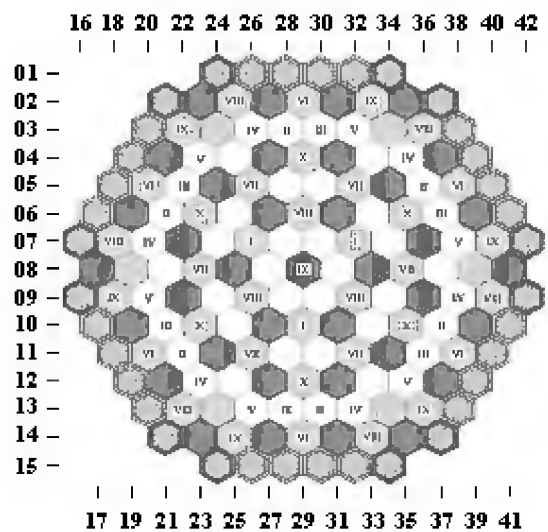


Рис. 1. Расположение ОР СУЗ топливной загрузки ВВЭР-1000

При этом рассматривались два набора ОР СУЗ: 61 ОР – ВВЭР-1000 (рис. 1), и 121 ОР – ВВЭР-1200 (рис. 2).

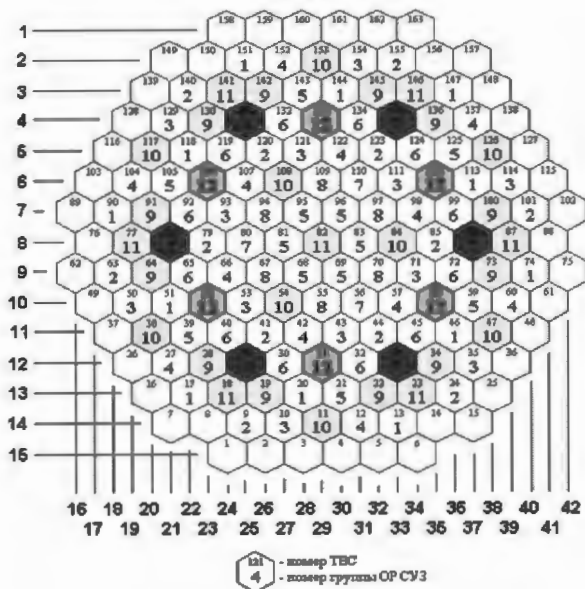


Рис. 2. Расположение ОР СУЗ топливной загрузки ВВЭР-1200

### Определение основных эффектов реактивности

Расчет эффектов реактивности (ЭФР) проводился из решения условно критической задачи для уравнения диффузии нейтронов в двухгрупповом по энергии нейтрона приближении [3]. Эффекты реактивности определялись как разница между двумя собственными числами условно критической задачи для двух состояний активной зоны ( $i = 1, 2$ ). При этом минимальное собственное число из решения однородного уравнения диффузии нейтронов для  $i$ -го состояния активной зоны

$$\lambda_i = \frac{1}{K_i}, \quad (1)$$

где  $K_i$  – эффективный коэффициент размножения нейтронов в реакторе для  $i$ -го состояния активной зоны.

Реактивность  $i$ -го состояния активной зоны

$$\rho_i = 1 - \frac{1}{K_i}. \quad (2)$$

Эффект реактивности при изменении параметров реактора при переходе из первого состояния во второе

$$\Delta\rho = \rho_1 - \rho_2 = \frac{K_1 - K_2}{K_1 K_2}. \quad (3)$$

Также учитывался тот факт, что полное расхолаживание активной зоны реактора после срабатывания АЗ можно осуществить только при наличии 121 ОР. При наличии 61 ОР СУЗ после их сброса из критического состояния зоны на номинальной мощности при расхолаживании до  $30^\circ\text{C}$  достигается повторная критичность реактора и происходит нейтронная вспышка [4]. Поэтому перед расхолаживанием в первом контуре создается концентрация борной кислоты  $12...16$  г/кг. При наличии 121 ОР СУЗ возможно расхолаживание первого контура до  $30^\circ\text{C}$  с сохранением подкритического состояния активной зоны и определение экспериментально с помощью стационарных приборов величины температурного эффекта реактивности в зоне без мощности.

Для измерения величин эффектов реактивности производилось динамическое моделирование сброса АЗ из 121 ОР СУЗ и фиксировалась подкритичность реактора на первой секунде после сброса. Далее фиксировались полный мощностной эффект реактивности (МЭР), температурный эффект реактивности (ТЭФ), эффект нестационарного отравления ксеноном активной зоны и в последнюю очередь – эффект стационарного отравления ксеноном.

Эксперимент проводился для начала (ВОС) и конца кампании (ЕОС) пусковой и стационарной топливных загрузок.

В таблице 1 приведены результаты расчетов эффектов реактивности при переходе реактора из «холодного» состояния на номинальную мощность при отсутствии борной кислоты с последовательным разогревом теплоносителя в реакторе без мощности, с выходом на номинальную мощность без отравления Хе, стационарное отравление Хе и стационарное отравление Sm для различных топливных загрузок и моментов кампании.

Таблица 1. ЭФР при отсутствии в воде борной кислоты при выходе на номинальную мощность

|                                                 | ВОС,<br>пуск. | ЕОС,<br>пуск. | ВОС,<br>стап. | ЕОС,<br>стап. |
|-------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\rho_{\text{tot}}^0, \%$                       | 17,4          | 10,91         | 18,17         | 11,58         |
| $\Delta\rho_{\text{T}}^0, \%$                   | -2,99         | -3,76         | -4,23         | -5,34         |
| $\Delta\rho_{\text{N}}^0, \%$                   | -1,64         | -2,06         | -2,02         | -2,64         |
| $\Delta\rho_{\text{Xe}}^0, \%$                  | -2,95         | -2,92         | -2,64         | -2,78         |
| $\Delta\rho_{\text{Sm}}^0, \%$                  | -0,58         | 0             | -0,18         | 0             |
| $\rho_{\text{tot}}^0, \%$                       | 9,24          | 2,17          | 9,09          | 0,83          |
| $\Delta\rho_{\text{bor}}^0, \%$                 | -9,24         | -2,17         | -9,09         | -0,83         |
| $\rho_{\text{crit}}^0 / \text{Крит. бор, г/кг}$ | 0/4,34        | 0/1,12        | 0/7,55        | 0/0,62        |

В таблице 2 приведены результаты расчетов эффектов реактивности при переходе реактора от номинальной мощности с критической концентрацией борной кислоты в «холодное» состояние с последовательным обнулением мощности, расхолаживанием теплоносителя в реакторе без мощности, последовательным разотравлением активной зоны от Хе и Sm для различных топливных загрузок и моментов кампании.

**Таблица 2.** ЭФР при критической концентрации борной кислоты при останове реактора

|                                              | ВОС,<br>пуск. | ЕОС,<br>пуск. | ВОС,<br>стац. | ЕОС,<br>стац. |
|----------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\rho_{crit}, \%/$<br><b>Крит. бор, г/кг</b> | 0/4,34        | 0/1,12        | 0/7,55        | 0/0,62        |
| $\Delta \rho_{Sm}, \%$                       | 0,58          | 0             | 0,18          | 0             |
| $\Delta \rho_{Xe}, \%$                       | 2,88          | 2,89          | 2,57          | 2,74          |
| $\Delta \rho_N, \%$                          | 1,39          | 1,99          | 1,7           | 2,63          |
| $\Delta \rho_T, \%$                          | 1,52          | 3,17          | 1,24          | 5,09          |
| $\rho_{tot0}, \%$                            | 6,36          | 8,05          | 5,69          | 10,45         |
| $\Delta \rho_{bor}, \%$                      | 11,03         | 2,17          | 12,47         | 1,13          |
| $\rho^0_{tot0}, \%$                          | 17,4          | 10,91         | 18,17         | 11,58         |

В таблице 3 приведены значения ЭФР при переходе реактора от номинальной мощности в «холодное» состояние с последовательным обнулением мощности, расхолаживанием и разотравлением активной зоны от Хе и Sm.

**Таблица 3.** ЭФР при критической концентрации борной кислоты при останове реактора и погруженных ОР СУЗ

|                                                          | ВОС,<br>пуск.    | ЕОС,<br>пуск.    | ВОС,<br>стац.    | ЕОС,<br>стац.     |
|----------------------------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------|
| $\rho_{crit}, /$<br><b>Крит. бор, г/кг</b>               | 0/4,34<br>-4,34  | 0/1,12<br>-1,08  | 0/7,55<br>-7,5   | 0/0,62<br>-0,54   |
| $\rho_{rod} (61)/$<br>$\Delta \rho_{rod} (121)$          | -9,22/<br>-14,32 | -8,93/<br>-14,17 | -9,23/<br>-17,61 | -10,31/<br>-18,27 |
| $\Delta \rho_{Sm} (61)/$<br>$\Delta \rho_{Sm} (121)$     | 0,61/<br>0,6     | 0/0              | 0,29/<br>0,45    | 0/0               |
| $\Delta \rho_{Xe} (61)/$<br>$\Delta \rho_{Xe} (121)$     | 3/<br>3,04       | 3,32/<br>3,31    | 2,81/<br>2,85    | 3,21/<br>3,21     |
| $\Delta \rho_N (61)/$<br>$\Delta \rho_N (121)$           | 1,82/<br>1,99    | 2,32/<br>2,46    | 2,02/<br>2,06    | 3,08/<br>3,02     |
| $\Delta \rho_T (61)/$<br>$\Delta \rho_T (121)$           | 4,85/<br>6,23    | 6,1/<br>7,62     | 2,86/<br>5,77    | 7,03/<br>9,69     |
| $\rho_{rod0} (61)/$<br>$\rho_{rod0} (121)$               | 1,04/<br>-2,46   | 2,81/<br>-0,78   | -1,24/<br>-6,4   | 3,01/<br>-2,35    |
| $\Delta \rho_{rod0} (61)/$<br>$\Delta \rho_{rod0} (121)$ | -5,32/<br>-8,85  | -5,25/<br>-8,88  | -6,93/<br>-12,11 | -7,44/<br>-12,92  |
| $\rho^0_{tot0}$                                          | 6,36/<br>6,39    | 8,05/<br>8,1     | 5,69/<br>5,71    | 10,45/<br>10,57   |

В таблице 4 приведены результаты расчетов эффектов реактивности при переходе реактора от номинальной мощности с критической концентрацией борной кислоты в «холодное» состояние с последовательным обнулением мощности, расхолаживанием теплоносителя, разотравлением активной зоны от Хе и Sm для различных топливных загрузок и моментов кампании при погруженных 121 ОР СУЗ.

**Таблица 4.** ЭФР при критической концентрации борной кислоты при останове реактора после сброса 121 ОР СУЗ на номинальной мощности

|                                                   | ВОС,<br>пуск. | ЕОС,<br>пуск. | ВОС,<br>стац. | ЕОС,<br>стац. |
|---------------------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| $\Delta \rho_{crit}, /$<br><b>Крит. бор, г/кг</b> | 0/4,34        | 0/1,08        | 0/7,5         | 0/0,54        |
| $\Delta \rho_{rod}$ на 1 с.                       | -18,45        | -18,4         | -19,97        | -22,62        |
| $\Delta \rho_N$ на 20 с.                          | 1,8           | 2             | 1,65          | 2,27          |
| $\Delta \rho_T$ на 30 °С                          | 7,35          | 9,18          | 5,31          | 10,39         |
| <b>Глубина<br/>йодной ямы</b>                     | -4,14         | -4,33         | -2,4          | -3            |
| $\Delta \rho_{Xe}$                                | 3,84          | 5,34          | 2,77          | 4,79          |
| $\rho_{rod0}$                                     | -5,45         | -1,88         | -10,23        | -5,17         |

В таблице 5 и 6 приведены результаты расчетов температурного и мощностного эффектов реактивности с нулевой и критической концентрацией борной кислоты для различных топливных загрузок и моментов кампании при извлеченных и погруженных ОР СУЗ.

**Таблица 5.** Значения ТЭР при разных условиях его определения

|                       | <b>Температурный коэффициент реактивности при разогреве или останове ЯЭУ (без мощности)</b> |                                |                               |                                |
|-----------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| $\rho^0_{tot0}$       | <b>Условия определения</b>                                                                  |                                |                               |                                |
| <b>ВОС,<br/>пуск.</b> | $C_{bor} = 0$<br>без ОР                                                                     | $C_{bor} = C_{crit}$<br>без ОР | $C_{bor} = C_{crit}$<br>61 ОР | $C_{bor} = C_{crit}$<br>121 ОР |
|                       | 2,97                                                                                        | 1,52                           | 4,85                          | 6,23                           |
| <b>ЕОС,<br/>пуск.</b> | $C_{bor} = 0$<br>без ОР                                                                     | $C_{bor} = C_{crit}$<br>без ОР | $C_{bor} = C_{crit}$<br>61 ОР | $C_{bor} = C_{crit}$<br>121 ОР |
|                       | 3,76                                                                                        | 3,17                           | 6,1                           | 7,62                           |
| <b>ВОС,<br/>стац.</b> | $C_{bor} = 0$<br>без ОР                                                                     | $C_{bor} = C_{crit}$<br>без ОР | $C_{bor} = C_{crit}$<br>61 ОР | $C_{bor} = C_{crit}$<br>121 ОР |
|                       | 4,23                                                                                        | 1,24                           | 2,86                          | 5,77                           |
| <b>ЕОС,<br/>стац.</b> | $C_{bor} = 0$<br>без ОР                                                                     | $C_{bor} = C_{crit}$<br>без ОР | $C_{bor} = C_{crit}$<br>61 ОР | $C_{bor} = C_{crit}$<br>121 ОР |
|                       | 5,34                                                                                        | 5,09                           | 7,03                          | 9,69                           |

Таблица 6. Значения МЭР при разных условиях его определения

|                       | Мощностной коэффициент реактивности при разогреве или останове ЯЭУ (без мощности) |                                              |                                             |                                              |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------------------------------|----------------------------------------------|
| $\rho_{\text{tot}}^0$ | Условия определения                                                               |                                              |                                             |                                              |
| ВОС, пуск.            | $C_{\text{bor}} = 0$<br>без ОР                                                    | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>без ОР | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>61 ОР | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>121 ОР |
|                       | 1,66                                                                              | 1,38                                         | 1,82                                        | 1,99                                         |
| ЕОС, пуск.            | $C_{\text{bor}} = 0$<br>без ОР                                                    | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>без ОР | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>61 ОР | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>121 ОР |
|                       | 2,06                                                                              | 1,99                                         | 2,32                                        | 2,46                                         |
| ВОС, стац.            | $C_{\text{bor}} = 0$<br>без ОР                                                    | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>без ОР | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>61 ОР | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>121 ОР |
|                       | 2,02                                                                              | 1,7                                          | 2,02                                        | 2,06                                         |
| ЕОС, стац.            | $C_{\text{bor}} = 0$<br>без ОР                                                    | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>без ОР | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>61 ОР | $C_{\text{bor}} = C_{\text{crit}}$<br>121 ОР |
|                       | 2,64                                                                              | 2,63                                         | 3,08                                        | 3,02                                         |

Сравнение значений эффектов реактивности в первых двух колонках таблиц 5 и 6 показывает влияние концентрации борной кислоты в теплоносителе на величины мощностного и температурного эффектов. Мощностной эффект меньше зависит от концентрации борной кислоты, т.к. основная составляющая компонента данного эффекта определяется доплер-эффектом на топливе, который практически не зависит от бора [3]. В конце кампании разница между эффектами при нулевой концентрации бора и критической с тем же знаком, что и в начале кампании, но эта разница невелика, так как значение критической концентрации само по себе невелико.

В таблицах 7 и 8 приняты следующие обозначения:

- %U-235 в  $\Delta V_1$  – взвешенное по потоку обогащение в области зоны без ОР;
- %U-235 в  $\Delta V_2$  – взвешенное по потоку обогащение в области зоны без ОР;
- $KV_1 * \Delta V_1$  – вклад в реактивность от области зоны без ОР СУЗ;
- $KV_2 * \Delta V_2$  – вклад в реактивность от области зоны под ОР СУЗ.

В таблице 7 приведены результаты расчетов температурного и мощностного эффектов реактивности при критической концентрации борной кислоты для пусковой топливной загрузки при извлеченных и погруженных органах регулирования СУЗ. Те же значения, но для стационарной загрузки, приведены в таблице 8.

Таблица 7. МЭР и ТЭР для пусковой загрузки

| Сост. а.з. | Условия определения эффектов   |       |                       | Условия определения эффектов   |       |                       |
|------------|--------------------------------|-------|-----------------------|--------------------------------|-------|-----------------------|
|            | без ОР                         | 61 ОР | 121 ОР                | без ОР                         | 61 ОР | 121 ОР                |
| ВОС, пуск. | $C_{\text{bor}} = 4,31$        |       |                       | $C_{\text{bor}} = 4,31$        |       |                       |
|            | %U-235 в $\Delta V_1$          |       | %U-235 в $\Delta V_2$ | %U-235 в $\Delta V_1$          |       | %U-235 в $\Delta V_2$ |
|            | 2,86                           | 1,98  | 2,86                  | 2,86                           | 1,98  | 2,86                  |
|            | $KV_1 * \Delta V_1$            |       | $KV_2 * \Delta V_2$   | $KV_1 * \Delta V_1$            |       | $KV_2 * \Delta V_2$   |
|            | 0,63                           | 0,37  | 0,77                  | 0,63                           | 0,37  | 0,77                  |
|            | $\Delta \rho_{\text{T}}^0, \%$ |       |                       | $\Delta \rho_{\text{N}}^0, \%$ |       |                       |
| ЕОС, пуск. | 1,52                           | 4,85  | 6,23                  | 1,38                           | 1,83  | 1,99                  |
|            | $C_{\text{bor}} = 1,12$        |       |                       | $C_{\text{bor}} = 1,12$        |       |                       |
|            | %U-235 в $\Delta V_1$          |       | %U-235 в $\Delta V_2$ | %U-235 в $\Delta V_1$          |       | %U-235 в $\Delta V_2$ |
|            | 2,86                           | 1,98  | 2,86                  | 2,86                           | 1,98  | 2,86                  |
|            | $KV_1 * \Delta V_1$            |       | $KV_2 * \Delta V_2$   | $KV_1 * \Delta V_1$            |       | $KV_2 * \Delta V_2$   |
|            | 0,64                           | 0,36  | 0,77                  | 0,64                           | 0,36  | 0,77                  |
| ЕОС, стац. | $\Delta \rho_{\text{T}}^0, \%$ |       |                       | $\Delta \rho_{\text{N}}^0, \%$ |       |                       |
|            | 3,17                           | 6,1   | 7,62                  | 1,99                           | 2,33  | 2,46                  |

Таблица 8. МЭР и ТЭР для стационарной загрузки

| Сост. а.з. | Условия определения эффектов   |       |                       | Условия определения эффектов   |       |                       |
|------------|--------------------------------|-------|-----------------------|--------------------------------|-------|-----------------------|
|            | без ОР                         | 61 ОР | 121 ОР                | без ОР                         | 61 ОР | 121 ОР                |
| ВОС, стац. | $C_{\text{bor}} = 7,5-7,55$    |       |                       | $C_{\text{bor}} = 7,5-7,55$    |       |                       |
|            | %U-235 в $\Delta V_1$          |       | %U-235 в $\Delta V_2$ | %U-235 в $\Delta V_1$          |       | %U-235 в $\Delta V_2$ |
|            | 4,34                           | 4,57  | 4,34                  | 4,34                           | 4,57  | 4,34                  |
|            | $KV_1 * \Delta V_1$            |       | $KV_2 * \Delta V_2$   | $KV_1 * \Delta V_1$            |       | $KV_2 * \Delta V_2$   |
|            | 0,57                           | 0,43  | 0,68                  | 0,57                           | 0,43  | 0,68                  |
|            | $\Delta \rho_{\text{T}}^0, \%$ |       |                       | $\Delta \rho_{\text{N}}^0, \%$ |       |                       |
| ЕОС, стац. | 1,24                           | 2,86  | 5,76                  | 1,7                            | 2,02  | 2,07                  |
|            | $C_{\text{bor}} = 1,12$        |       |                       | $C_{\text{bor}} = 1,12$        |       |                       |
|            | %U-235 в $\Delta V_1$          |       | %U-235 в $\Delta V_2$ | %U-235 в $\Delta V_1$          |       | %U-235 в $\Delta V_2$ |
|            | 4,34                           | 4,57  | 4,34                  | 4,34                           | 4,57  | 4,34                  |
|            | $KV_1 * \Delta V_1$            |       | $KV_2 * \Delta V_2$   | $KV_1 * \Delta V_1$            |       | $KV_2 * \Delta V_2$   |
|            | 0,58                           | 0,42  | 0,71                  | 0,58                           | 0,42  | 0,71                  |
| ЕОС, стац. | $\Delta \rho_{\text{T}}^0, \%$ |       |                       | $\Delta \rho_{\text{N}}^0, \%$ |       |                       |
|            | 5,09                           | 7,03  | 9,69                  | 2,62                           | 3,03  | 3,04                  |

Сравнение полученных значений температурных и мощностных эффектов реактивности в зависимости от числа погруженных ОР СУЗ в зону показало, что эффекты реактивности по модулю существенно увеличиваются по сравнению с состоянием зоны без ОР СУЗ. Этот факт обусловлен двумя причинами. Первая причина связана с тем, что при вводе 61 ОР СУЗ увеличивается вклад в реактивность от ТВС без ОР СУЗ, а в этой области обогащение топлива заметно выше обогащения топлива под ОР СУЗ. Поэтому даже если бы зависимость температурного эффекта реактивности для ТВС с ОР СУЗ осталась такой же, что и для ТВС без ОР, суммарная величина температурного эффекта по модулю увеличилась. В то же время, изменение размножающих свойств в ТВС с ОР СУЗ при изменении температуры теплоносителя происходит гораздо сильнее, чем для ТВС без ОР. В этом заключается вторая причина, по которой температурный эффект реактивности по модулю увеличивается при вводе ОР СУЗ в активную зону.

При вводе 121 ОР СУЗ наблюдаются те же два явления, что и при вводе 61 ОР, но есть некоторые отличия. В первую очередь, они проявляются в том, что в случае с вводом 121 ОР среднее обогащение области зоны без ОР заметно выше, чем для области активной зоны без 61 ОР СУЗ при их вводе в зону. Вклад в реактивность от области зоны без ОР при вводе 121 ОР такой же, как и вклад в реактивность от области без ОР СУЗ при извлеченных органах регулирования. В этом случае эффект усиления температурного эффекта за счет 1-го явления происходит вследствие повышенного обогащения в области без ОР, а не увеличения вклада в реактивность, как это происходит в случае погружения 61 ОР СУЗ.

Для мощностного эффекта реактивности наблюдается та же закономерность изменения эффектов, что и для температурного эффекта. В то же время, масштаб изменения заметно меньше. Это объясняется тем, что большая доля мощностного эффекта принадлежит доплер-эффекту на топливе, который незначительно зависит от наличия или отсутствия в зоне твердых поглотителей тепловых нейтронов, т. к. доплер-эффект проявляется в области энергией гораздо выше энергии тепловых нейтронов.

Сравнение величин МЭР и ТЭР в зависимости от времени кампании показало, что в конце кампании (как для пусковой, так и для стационарной топливных загрузок) наблюдаются те же закономерности зависимости эффек-

тов реактивности от наличия твердых поглотителей, но масштаб величин этих эффектов несколько выше, т. к. концентрация бора в теплоносителе в конце кампании гораздо ниже, чем в начале.

## Заключение

Проведенные исследования особенностей основных статических характеристик активной зоны ВВЭР, определяющих поведение реактора на стационарных режимах и во время медленных переходных процессов длительностью от десятка минут до суток, показали следующие результаты:

- зависимость мощностного эффекта реактивности от концентрации борной кислоты в теплоносителе меньше, чем температурного эффекта реактивности, т.к. основная составляющая мощностного эффекта определяется доплер-эффектом на топливе, практически не зависящем от концентрации борной кислоты;
- значения температурного и мощностного эффектов реактивности по модулю существенно увеличиваются при погружении ОР СУЗ в активную зону;
- при увеличении числа ОР СУЗ, вводимых в зону с 61 (ВВЭР-100) до 121 (ВВЭР-1200) также наблюдается увеличение температурного и мощностного эффектов реактивности. В то же время, эффект усиления температурного эффекта происходит вследствие повышенного обогащения в области без ОР, а не увеличения вклада в реактивность, как в случае погружения 61 ОР СУЗ. Кроме того, масштаб изменения мощностного эффекта реактивности заметно меньше, чем температурного, т. к. большая доля мощностного эффекта принадлежит доплер-эффекту на топливе, который незначительно зависит от наличия или отсутствия в зоне твердых поглотителей тепловых нейтронов.
- в конце кампании наблюдаются те же закономерности зависимости величин эффектов реактивности от наличия твердых поглотителей, но масштаб величин этих эффектов несколько выше, т. к. концентрация борной кислоты в теплоносителе в конце кампании гораздо ниже, чем в начале.

## Список литературы

1. Сукрушев А.В. Обеспечение безопасности ВВЭР-1000 в случае его разгона на мгновенных нейтронах / Сукрушев А.В., Наточий Ю.А., Ни-

- конов А.А., Семенов Е.С. // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №4. – С. 15 – 19.
2. 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.
  3. 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.
  4. Браславский Ю.В. Исследование влияния конструкции и состояния активной зоны реактора на достижение повторной критичности / Ю.В. Браславский, К.Б. Матузаев, М.А. Тригуб // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №3. – С. 5 – 10.

### References

1. Sukrushev A.V., Natochey J.A., Nikonov A.A., Semenov E.S. WWER-1000 safety precautions in case of its power excursion with the help of prompt neutrons. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii [Energy installations and technologies]*. Sevastopol', FAEI HE STU Publ., 2016, Vol. 2, No 4, pp.15-19.
2. 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 MEPFI Publ., 2013, 304 p.
3. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek. *Fizicheskie i konstruktivnye osobennosti yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [WWER nuclear installations physical and specific design features]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2011, 376 p.
4. Braslavskiy Yu.V., Matuzayev K.B., Trigub M.A. Research of the Reactor Core Construction and Condition Impact on the Recriticality Attainment. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii [Energy installations and technologies]*. Sevastopol', FAEI HE STU Publ., 2016, Vol. 2, No 3, pp.5-10.

УДК 621.039.56

# Гравитационные эффекты двойных систем монополей естественных реакторов

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, [kachur\\_62@mail.ru](mailto:kachur_62@mail.ru)

Статья поступила 23.10.2017 г.; после доработки 25.10.2017 г.

## Аннотация

*Предложен новый подход к определению механизма генерации гравитационных волн двойными системами сверхмассивных космических объектов.*

*Ключевые слова:* естественный реактор, пространственно-временной монополь, гравитационная волна, двойная система звезд.

# Gravitation Effects of Double Systems of Monopole of Natural Reactors

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [kachur\\_62@mail.ru](mailto:kachur_62@mail.ru)

Received 23.10.2017 y.; received in final form 25.10.2017 y.

## Abstract

*Offered new approach to determination of mechanism of generation of gravitation waves by the double systems of supermassive space objects.*

*Keywords:* natural reactor, spatio-temporal monopole, gravitation wave, double system of stars.

## Введение

Общая теория относительности (ОТО) предсказывает, что пространство принимает фиксированную искривленную форму, если материя совершенно неподвижна, но по ткани пространства пронесется рябь, когда материя движется вперед-назад. Эйнштейн в 1916-1918 гг. написал уравнения общей теории относительности и показал, что подобное движение материи (например, при взрыве сверхновой звезды) вызывает гравитационные волны.

Поскольку гравитация отражает искажение пространства, то гравитационные волны являются волнами кривизны [1-4].

В ОТО гравитация возникает как следствие искривления пространства-времени вблизи массивных тел, однако причины подобного искрив-

ления не определяются. Структуру гравитационного поля пытаются определить также в квантовой гравитации с помощью методов квантовой теории поля. Одной из проблем здесь является то, что до сих пор не доказано, что гравитоны действительно должны иметь спин, кратный постоянной Дирака  $\hbar$ . В теории бесконечной вложенности материи осуществляется подобие уровней материи и распределение всех природных объектов по различным уровням в зависимости от масс и размеров. Предполагается, что теория гравитации Лесажа справедлива для всех уровней материи, причём включение в потоки гравитонов заряженных релятивистских частиц позволяет дополнительно объяснить происхождение кулоновской силы между электрическими зарядами. Согласно теории, каждый материальный объект состоит из частиц, принадлежащих

низшим уровням материи, а каждый волновой квант может быть разложен на более мелкие кванты. Между веществом и квантами поля имеется связь, заключающаяся в том, что они генетически порождают друг друга на разных уровнях материи. В частности находится, что гравитонами для обычной гравитации могут быть кванты поля, излучаемые частицами, из которых строится вещество нуклонов. В рассмотрение вводится также сильная гравитация, действующая на уровне элементарных частиц. На основе сильной гравитации и поля кручения обосновывается гравитационная модель сильного взаимодействия. Одним из следствий этого является то, что гравитационное и электромагнитное поля являются фундаментальными полями, действующими на разных уровнях материи посредством полевых квантов с различной величиной своего спина и энергии, и с различной проникающей способностью в веществе.

Физики на обсерватории LIGO (Laser Interferometric Gravitational Observatory) впервые зарегистрировали гравитационные волны – возмущения пространства-времени, предсказанные Альбертом Эйнштейном, 14 сентября 2015 года. Детекторы LIGO обнаружили относительные колебания величиной в десять в минус 19 степени метров. Возмущения были порождены парой черных дыр (в 29 и 36 раз тяжелее Солнца) (рис. 1) в последние доли секунды перед их слиянием в более массивный вращающийся гравитационный объект (в 62 раза тяжелее Солнца). За доли секунды примерно три солнечных массы превратились в гравитационные волны, максимальная мощность излучения которых была примерно в 50 раз больше, чем от всей видимой Вселенной. Слияние черных дыр произошло 1,3 миллиарда лет назад. Столько времени гравитационное возмущение распространялось до Земли [5].

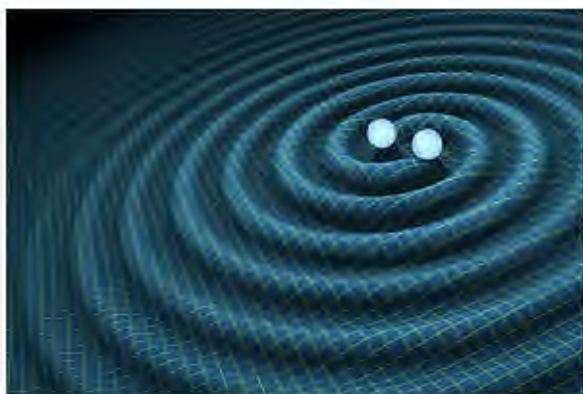


Рис. 1. Компьютерная имитация процесса слияния двух черных дыр.

В настоящее время никто не сомневается в существовании гравитационных волн, но механизм их возникновения не определен. В предлагаемой статье предпринята попытка описать этот механизм для двойных систем звезд или черных дыр. Выдвигается гипотеза, что гравитационные волны возникают не только в результате коллапса космических систем, но являются неотъемлемой составляющей существования двойных систем. Доказывается, что двойные системы являются постоянными генераторами гравитационных излучений. Представляется, что галактики, имеющие перемычку (бар), также являются двойными системами.

### Цели и задачи исследования

Цель исследования – описание механизма возникновения гравитационных волн в двойных системах сверхмассивных космических объектов за счет взаимодействия монополей их естественных реакторов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- провести анализ существующих представлений о гравитационном излучении;
- определить механизм генерации гравитационных волн как неотъемлемую составляющую существования двойных систем звезд, черных дыр, галактик;
- описать уравнение генерируемой двойной системой гравитационной волны.

### Современное представление о гравитационном излучении

Предлагаемый обзор выполнен по материалам Википедии.

Гравитационное излучение – это излучение гравитационных волн, или волн тяготения, неравномерно движущимися массами (телами).

Гравитационная волна в общей теории относительности — гипотетическая волна гравитации (порождаемая, как предполагается, ускоренным движением гравитирующих тел), «отрывающаяся» от источника гравитации и свободно распространяющаяся в пространстве, приводящая к изменению (возмущению) гравитационного поля в окружающем пространстве (т.н. «рябь пространства-времени»). Ввиду относительной слабости (по сравнению с прочими) гравитационных сил, эти волны должны иметь весьма малую величину, с трудом поддающуюся регистрации.

В соответствии с принятыми представлениями гравитационная волна вызывает сжатие пространства, которое чередуется с его расширением (рис. 2)

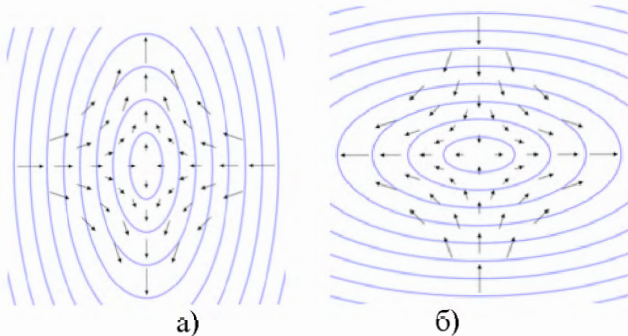


Рис. 2. Сжатие (а) и расширение (б), вызванное гравитационной волной.

В рамках ОТО гравитационные волны описываются решениями уравнений Эйнштейна волнового типа, представляющими собой движущееся со скоростью света возмущение метрики пространства-времени. Проявлением этого возмущения должно быть, в частности, периодическое изменение расстояния между двумя свободно падающими (то есть не испытывающими влияния никаких сил) пробными массами. Амплитудой  $h$  гравитационной волны является безразмерная величина — относительное изменение расстояния. Предсказываемые максимальные амплитуды гравитационных волн от астрофизических объектов (например, компактных двойных систем) и явлений (взрывов сверхновых, слияний нейтронных звёзд, захватов звёзд чёрными дырами и т.п.) при измерениях в Солнечной системе весьма малы ( $h=10^{-18}-10^{-23}$ ). Слабая (линейная) гравитационная волна согласно общей теории относительности движется со скоростью света, является поперечной, квадрупольной и описывается двумя независимыми компонентами, расположенными под углом  $45^\circ$  друг к другу (имеет два направления поляризации).

Различные теории по-разному предсказывают скорость распространения гравитационных волн. В общей теории относительности она равна скорости света в линейном приближении и может быть меньше её из-за эффектов нелинейности гравитации.

Наиболее сильными источниками гравитационных волн являются:

- сталкивающиеся галактики (гигантские массы, небольшие ускорения);
- гравитационный коллапс двойной системы компактных объектов (колоссальные уско-

рения при довольно большой массе); частный и наиболее интересный случай — это слияние нейтронных звёзд.

Любая двойная звезда при вращении её компонент вокруг общего центра масс теряет энергию (как предполагается — за счёт излучения гравитационных волн) и, в конце концов, сливается воедино. Но, для обычных, некомпактных двойных звёзд этот процесс занимает очень долгое время, много большее настоящего возраста Вселенной. Если же двойная компактная система состоит из пары нейтронных звёзд, чёрных дыр или их комбинации, то слияние может произойти за несколько миллионов лет. Сначала объекты сближаются, а их период обращения уменьшается. Однако на заключительном этапе происходит столкновение и несимметричный гравитационный коллапс. Этот процесс длится доли секунды, и за это время в гравитационное излучение уходит энергия, составляющая по некоторым оценкам более 50% от массы системы.

Важная отличительная особенность гравитационных волн: в отличие от электромагнитных, звуковых и поверхностных волн — волн, распространяющихся через пространство, — гравитационные волны распространяются в пространстве. Они являются распространяющимися искажениями геометрии самого пространства. С каждым проходящим пиком и впадиной гравитационная волна будет растягивать пространство (и всё в нём) в одном направлении и сжимать пространство (и всё в нём) в перпендикулярном направлении, как это показано на рис. 3. В принципе, можно обнаружить прохождение гравитационных волн, периодически измеряя расстояние между различными точками и обнаружив, что отношение этих расстояний периодически меняется. Но на практике ещё никто не сумел сделать это



Рис. 3. Деформация объекта гравитационной волной.

### Генерация гравитационных излучений двойными системами естественных реакторов

В отличие от приведенного выше описания гравитационного излучения, гравитационной

волны предлагаемый механизм генерации базируется на следующих представлениях.

Во-первых, гравитационное излучение порождается не самими объектами, а взаимодействием их пространственно-временных монополей, которые являются порождением естественных реакторов ядер космических объектов. Следовательно, коллапс двойных систем связан не с расходом энергии на генерацию гравитационных волн, а с уменьшением мощности естественных реакторов, расходующих запасы топлива при функционировании.

Во-вторых, гравитационная волна не деформирует (искривляет) пространство и объекты, как показано на рис. 3. Гравитационная волна создает в конкретной точке пространства новое течение времени, не воздействуя на скорости движения. Изменение хода времени при постоянстве скорости влияет на временной интервал прохождения некоего расстояния, создавая иллюзию реального сжатия или расширения трехмерного пространства. Гравитационная волна пространство как физическую материю не меняет. Попадая в искривленное пространство, человек не станет выше и худее или ниже и толще.

В-третьих, привнесенное в точку трехмерного пространства изменение времени создает параллельное пространство с новым ходом времени, которое не оказывает влияния на исходное пространство, определенное исходным течением времени. Изменение в конкретной точке пространства хода времени происходит по гармоническому закону, сменяя ускорение (расширение) и замедление (сжатие) времени.

В-четвертых, гравитационная волна образует сферы пространства, описываемые коэффициентом искривления. Сферы меняют значение этого коэффициента с появлением нового уровня гравитационной волны. Коэффициент искривления принимает дискретные значения. Следовательно, искривленные пространства образуют множество независимых сфер.

В-пятых, пространственные сферы, образованные гравитационным излучением различных двойных систем, существуют параллельно друг другу. Пересечение сфер возможно при совпадении коэффициентов искривления. Представляется, что такие точки пересечения соответствуют «кротовым норам». Сферы образуют пространственный океан. В нашем (исходном) пространстве можно зарегистрировать только те изменения пространства, которые соответствуют кривизне нашего пространства, т.е. практически не изменяют ход времени. Представляется, что

именно это определяет сложность регистрации гравитационных волн.

Рассмотрим механизм генерации гравитационных волн.

Предположим, двойную систему образуют две звезды, каждая из которых имеет пространственно-временную монополь типа голая сингулярность, т.е. за областью коллапса с ядром черной дыры в центре следует область расширения, затем область задержки, далее область сжатия [6]. Пространственно-временные монополи звезд должны иметь равные значения коэффициентов искривления пространства. Радиусы монополей равны, поскольку задаются коэффициентами искривления пространства. При этом звезды могут иметь различные массы и размеры, так как коэффициент искривления определяется коэффициентом усиления естественного реактора [7]. Звезды имеют одинаковую скорость движения по единой орбите относительно центра масс  $S$  системы, который располагается в зоне пересечения областей сжатия монополей (рис. 4).

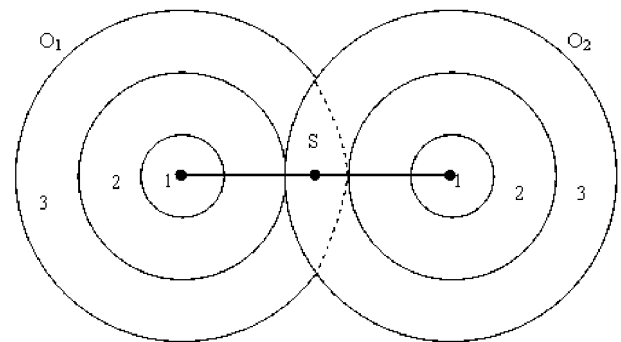


Рис. 4. Структура двойной системы пространственно-временных монополей объектов  $O_1$  и  $O_2$ : 1 – область расширения, 2 – область задержки, 3 – область сжатия.

Для двойной системы черных дыр отличие состоит в последовательности областей, она является обратной, т.е. после области коллапса следует область сжатия, затем задержки, после этого расширения.

Эквивалентная масса центра системы монополей может быть определена из соотношения

$$a' \equiv a_3 + a_2 - a_1 = \gamma \frac{M_S}{(R/2)^2}, \quad (1)$$

где  $a_1, a_2, a_3$  – ускорения в областях расширения, задержки и сжатия соответственно;

$M_S$  – эквивалентная масса центра системы;

$R$  – расстояние между центрами космических объектов;  $\gamma$  – гравитационная постоянная.

Без учета монополей объектов эквивалентная масса центра системы равна

$$M'_S = \frac{M_1 + M_2}{2}, \quad (2)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – масса первого и второго объектов соответственно.

В соответствии со всемирным законом тяготения ускорение относительно центра масс системы рассчитывается по формуле

$$a = \gamma \frac{M'_S}{(R/2)^2}. \quad (3)$$

Объединение двух монополей голых сингулярностей порождает в центре двойной системы монополь скрытой сингулярности, т.е. черную дыру без реального ядра. В случае объединения двух черных дыр в центре системы образуется монополь голой сингулярности при отсутствии реальной звезды. Коэффициент искривления пространства монополей типа «скрытая сингулярность» кратен  $2\pi$ , а для типа «голая сингулярность» –  $2e$  [7].

Поэтому зависимость ускорений и масс для двойной системы звезд или черных дыр определяется из (1) и (3) следующими соотношениями

$$a' = \frac{\pi}{e} a, \quad (4)$$

$$M_S = \frac{\pi}{e} M'_S. \quad (5)$$

Для объединения галактик соотношения (4) и (5) будут иметь вид [7]

$$a' = \sqrt{2} \frac{\pi}{e} a,$$

$$M_S = \sqrt{2} \frac{\pi}{e} M'_S.$$

Таким образом, механизм генерации для двойной системы звезд следующий.

Увеличение эквивалентной массы центра системы монополей до  $M_S$  приводит к увеличению коэффициента искривления пространства. Следовательно, в области сжатия ускорение  $a_3$  уменьшается, что приводит к росту ускорения  $a_2$  в области задержки, которое препятствует сжатию и уменьшает массу центра до  $M'_S$ . Это вызывает уменьшение коэффициента искривления и возрастание ускорения  $a_3$ , а также уменьшение ускорения  $a_2$ . Сжатие снова усиливается, и эквивалентная масса центра возрастает в соответствии с (1) до  $M_S$ . Цикл колебания эквивалентной массы повторяется, вызывая генерацию гравитационной волны. Колебание массы не влияет на ускорение  $a_1$  зоны расширения. Зависимость изменения  $a_2$  и  $a_3$  является нелинейной.

Скорость движения объектов относительно центра масс двойной системы звезд определяется из соотношения

$$\frac{MV^2}{2} = \gamma \frac{M \cdot M_S}{R/2}$$

или

$$V = \sqrt{\frac{2\gamma\pi(M_1 + M_2)}{eR}}. \quad (6)$$

Частота генерации зависит от скорости движения объектов по орбите

$$\omega = \frac{2\pi V}{2\pi R/2} = 2V/R.$$

Гравитационная волна создает в момент времени  $t$  сферы пространств радиусом  $r$  с центром в точке  $S$  и коэффициентом искривления  $k$  (при условии, что  $k=2\pi n$ ) в соответствии со следующим уравнением

$$k(r, t) = \Delta k \sin\left(\omega t + \frac{r\omega}{c}\right), \quad (7)$$

$$\Delta k = k_0(\pi/e - 1),$$

где  $k_0$  – коэффициент искривления пространства монополя каждой из двух звезд.

Уравнение (7) назовем уравнением гравитационной волны, искривляющей космическое пространство.

## Заключение

Предложен новый взгляд на механизм генерации гравитационных волн двойными системами сверхмассивных космических объектов. Выдвинуто предположение, что гравитационные волны возникают в результате взаимодействия пространственно-временных монополей естественных реакторов объектов, порождающих двойную систему. Определены свойства таких волн, приведено уравнение гравитационной волны.

Описанный механизм возникновения гравитационных волн предоставляет новые возможности для развития теории гравитации.

## Список литературы

1. Логунов А.А. Основы релятивистской теории гравитации. / А.А. Логунов, М.А. Мествиришвили – М: Изд-во МГУ, 1986. – 608 с.
2. Федосин С.Г. Физические теории и бесконечная вложенность материи. / С.Г. Федосин – Пермь, 2009. – 844 с.
3. Зельдович Я.Б. Тяготение, общая теория относительности и альтернативные теории/ Зельдович Я.Б., Л.П. Гришук // УФН. – 1986. –Т. 149. – № 4. – С. 695-707.
4. Вебер Дж. Общая теория относительности и гравитационные волны – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1962. – 272с.

5. Физики обнаружили волны пространства-времени, lenta.ru, 11 февраля 2016
6. Качур С.А. Управление ядерными реакторами на основе кривизны пространства./ С.А. Качур. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2016. – 220с.
7. Качур С.А. Строение Вселенной на основе пространственно-временных монополей естественных реакторов./ С.А. Качур. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2017. – 96с.

## References

1. Logunov A.A., Mestvirshvili M.A.. *Osnovy relyativistskoj teorii gravitacii* [Bases of relativism theory of gravitation]. Moscow, Izd-vo MGU, 1986, 608 p.
2. Fedosin S.G. *Fizicheskie teorii i beskonechaya vložennost' materii* [Physical theories and endless in-laid of matter]. Perm', 2009, 844 p.
3. Zel'dovich Ya.B., Grischuk L.P. Gravitation, general theory of relativity and alternative // *UFN*, 1986, Vol. 149, No. 4, pp. 695-707.
4. Weber J. *Obschaya teoriya otnositel'nosti i gravitacionnye volny* [General relativity and gravitational waves]. Moscow, Iz-vo inostr. lit-ry. 1962, 272 p.
5. Fiziki obnaruzhili volny prostranstva-vremeni (Physicists found out the waves of space-time)\_lenta.ru/ (11 Feb. 2016)
6. Kachur S.A. *Upravlenie yadernymi reaktorami na osnove krivizny prostranstva* [Control by nuclear reactors on the basis of space curvature]. Sebastopol: «РИБЕСТ». 2016, 220p.
7. Kachur S.A. *Stroenie Bselennoj na osnove prostranstvenno-vremennyh monopolej estestvennyh reaktorov* [Structure of Universe on the basis of spatio-temporal monopole of natural reactors]. Sebastopol: «РИБЕСТ». 2017, 96p.

УДК 621.433.144

## Акустическая кавитация и ее применение в науке и технике

В.А. Пухлий<sup>1</sup>, С.Т. Мирошниченко<sup>1</sup>, А.А. Журавлев<sup>1</sup>, Е.В. Глушкова<sup>1</sup>,  
В.О. Пантель<sup>1</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,  
г. Севастополь, 299053, Россия. <sup>1</sup>pu1611@rambler.ru

Статья поступила 01.12.2017 г.; после доработки 01.12.2017 г.

### Аннотация

Рассматриваются два аспекта применения процесса акустической кавитации: приложение в ядерном синтезе и приложение в технологии обезвреживания жидких радиоактивных отходов, при этом использование местных материалов в технологических процессах очистки жидких радиоактивных отходов связано с получением высокодисперсных нанонаполнителей.

**Ключевые слова:** акустическая кавитация, ядерный синтез, жидкие радиоактивные отходы, высокодисперсные нанонаполнители

## Acoustic cavitation and its application in science and technician

V.A. Pukhliy<sup>1</sup>, S.T. Miroshnichenko<sup>1</sup>, A.A. Zhuravlev<sup>1</sup>, E.V. Glushkova<sup>1</sup>, V.O. Pantel<sup>1</sup>

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
<sup>1</sup>pu1611@rambler.ru

Received 01.12.2017 y.; received in final form 01.12.2017 y.

### Abstract

It is considered two aspects of application of process acoustic cavitation: the appendix in nuclear synthesis and the appendix in technologies of neutralization of a liquid radioactive waste, thus use of local materials in technological processes of clearing of a liquid radioactive waste is connected with reception high disperse nanofilling.

**Keywords:** acoustic cavitation, nuclear synthesis, a liquid radioactive waste, high disperse nanofillings.

### Введение

Под акустической кавитацией в современной науке подразумевается образование и захлопывание полостей в жидкости под воздействием звука [1].

При этом процессе образуются полости в результате разрыва жидкости во время полупериодов сжатия.

Полости заполнены в основном насыщенным паром данной жидкости, поэтому процесс иногда называется паровой кавитацией, в отличие от газовой кавитации интенсивных нелинейных колебаний газовых (обычно воздушных) пузырьков в звуковом поле, существовавших в

жидкости до включения звука.

Если газовая кавитация может протекать с большей или меньшей интенсивностью при любых значениях амплитуды давления звуковой волны, то паровая кавитация реализуется лишь при достижении некоторого критического значения амплитуды давления, так называемого кавитационного порога.

Величина этого порога – от давления насыщенного пара жидкости до нескольких десятков и даже сотен атмосфер в зависимости от содержания в жидкости зародышей.

При захлопывании сферической полости давление в ней резко возрастает, как при взрыве,

что приводит к излучению импульса сжатия.

Если увеличить содержание газа в жидкости, тогда диффузия газа в полости усилится, захлопывание полостей станет неполным и подъем давления при захлопывании будет небольшим. При содержании газа в жидкости более 50% от насыщения возникает кавитационное обезгаживание жидкостей, т.е. образование и всплывание газовых пузырьков, при этом паровая кавитация вырождается в газовую. Если образовавшиеся паровые пузырьки колеблются вблизи границы с твердым телом, около них возникают интенсивные микропотоки. Появление кавитации ограничивает дальнейшее повышение интенсивности звука, излучаемого в жидкости, что влечет за собой снижение нагрузки на излучатель.

Акустическая кавитация характеризуется рядом эффектов. Часть из них, например, разрушение и диспергирование твердых тел, эмульгирование жидкостей, очистка обязаны своим происхождением ударам при захлопывании полостей и микропотокам вблизи пузырьков.

Другие эффекты, в частности, ускорение химических реакций, связаны с ионизацией при образовании полостей.

Благодаря этим эффектам акустическая кавитация находит все более широкое применение для создания новых и совершенствования известных технологических процессов. В связи с этим следует отметить, что большинство практических применений ультразвука основано на эффекте кавитации.

В настоящей работе будет рассмотрено 2 аспекта применения акустической кавитации:

- а) приложение в ядерном синтезе;
- б) приложение в технологии обезвреживания жидких радиоактивных отходов.

### **Постановка цели и задач научного исследования**

Целью научной работы является изучение процессов акустической кавитации и использования их в современной науке и технике.

### **Применение акустической кавитации в ядерном синтезе**

Впервые тема холодного термоядерного синтеза возникла в 1989 г, когда американский химик Стенли Понс и его английский учитель Мартин Флейшман предположили возможность протекания управляемой реакции термоядерного синтеза при  $T = 20^\circ\text{C}$  в тяжелой воде на основе

явления электролиза с использованием палладиевых электродов. По их заявлению в результате реакции атомы водорода и дейтерия соединились в один атом трития, при этом выделялась энергия, а также были зарегистрированы нейтроны и гамма-кванты. Попытка других ученых повторить результаты этих физиков не увенчалась успехом, в результате чего эксперимент Мартина Флейшмана и Стенли Понса был дезавуирован. Так исторически началась проблема холодного ядерного синтеза (cold fusion).

В 1995 г академик РАН Р.И. Нигматулин совместно с Ричардом Лэхи выступил с докладом «Перспективы пузырькового термояда» на Международной конференции по ядерным реакторам в США. После доклада известный американский физик Рузи Талейярхан предложил академику Р.И. Ниматулину сотрудничество по указанной проблеме. Он нашел возможность финансирования проблемы, известных специалистов, в частности Колина Веста, руководившего в США 2-х миллиардной ядерной программой.

Идея пузырькового термояда заключается в том, что если «обстреливать» специально подготовленный раствор мощным ультразвуковым импульсом (акустическая кавитация), то возможно зажечь в этом растворе термоядерную реакцию. Возникающие при этом пузырьки газа в растворе начнут быстро схлопываться, температура в них существенно поднимается (сонолюминисценция) и атомы водорода станут попарно соединяться, высвобождая дополнительную энергию в виде нейтронов.

По утверждению одного из соавторов пузырькового термояда академика Р.И. Нигматулина, неправильно называть этот вид термоядерного синтеза разновидностью «холодного термояда». На самом деле, это – супергорячий термояд, это микроволновая бомба [1].

В центре пузырька, который испускает нейтроны, температура  $T = (100 \div 200) \times 10^6 \text{ K}$ . Сам процесс длится доли пикосекунд ( $10^{-12}$  сек). За это время реализуется схлопывание пузырька, при этом из каждого пузырька успевает вылететь порядка десятка нейтронов. В результате получится около 500 000 нейтронов в секунду. Это много с точки зрения физики явления, но это мало, чтобы это было термоядерным реактором. Таким образом, получено не «термоядерное горение», а только термоядерные «искры». Можно предположить, что из искры пузырькового нанотермояда возгорится термоядерное пульсирующее пламя [5, 6].

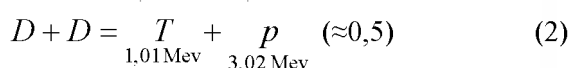
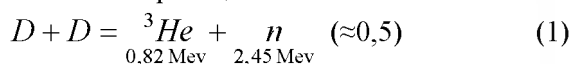
Следует отметить, что задача из чисто физической приобретает «химическое измерение».

Акустическая кавитация используется для того, чтобы инициировать определенные химические реакции, что само по себе представляет определенный научный интерес.

Эксперимент, поставленный группой Рузи Талейрхана, профессора университета Пердью (штат Индиана), позволил получить первые результаты исследования реакции «соно-синтеза» (sonofusion) еще в 2002 году [2], когда его лаборатория базировалась в Национальной лаборатории Ок-Риджа (штат Теннесси).

Из ядерной физики известно, что для того, чтобы начались ядерные реакции, необходимо, чтобы ядра, преодолевая взаимное электростатическое отталкивание, приблизились друг к другу достаточно близко. В случае горячего термояда это осуществляется за счет большой кинетической энергии ядер, то есть за счет высокой температуры, достигающей сотни миллионов градусов Кельвина.

Синтез ядер дейтерия может осуществляться на основе 2-х реакций:



Выход каждой из реакций (1) и (2) составляет 50%.

Холодный термояд подразумевает, что ядра сближаются за счет высокого давления (сильного сжатия) образца. В работе [2] подчеркивается, что главная причина начала термоядерной реакции – высокая температура в схлопывающемся пузырьке ( $10^7$  K).

Рассмотрим основные физические явления, лежащие в основе пузырькового термояда.

В 2006 г группа физиков, в том числе Рузи Талейрхан и Р.И. Нигматулин, сообщили об опытах над смесью дейтерированных бензола и ацетона [6].

Чтобы зажечь термоядерную реакцию в них растворили немного солей урана, служащего источником альфа-частиц. Как свидетельствует академик Р.И. Нигматулин, самым сложным в этих исследованиях было образование кавитационного сферического кластера пузырьков. В экспериментах было зафиксировано и свечение и поток нейтронов, при этом их энергии оказались именно такими, какими должны быть у продуктов термоядерного синтеза.

### Сонолюминисценция

В процессе акустической кавитации вода с микропузырьками газа излучает свет, если через

нее пропускать ультразвук. Данный эффект, получивший в физике название «сонолюминисценция» был открыт в 1934 году немецкими учеными, работавшими над созданием сонаров для подводных лодок. Исследования показали, что при схлопывании пузырьков температура в них может достигать порядка  $10^6$ °C, а давление сотни, тысячи атмосфер.

Под действием звуковой волны пузырьки газа в воде в такт колебаниям расширяются и сжимаются от нескольких микрон до нескольких десятков микрон, при этом изменения объемов могут быть очень большие (диаметр пузырьков может меняться в десятки раз). При таком сжатии газ сильно нагревается и излучает свет (рис.1).

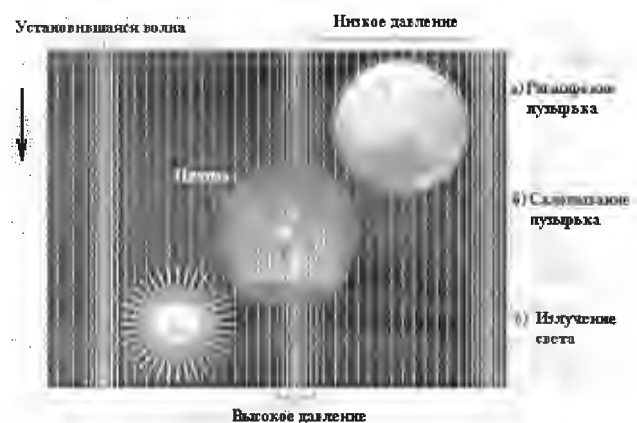


Рис. 1. Излучение света пузырьками при воздействии ультразвука.

В 1993 г американский физик Лари Крам установил, что свет излучается не все время, в течение которого газ сжат, а сверхкороткими вспышками продолжительностью в несколько десятков пикосекунд.

Вспышка возникает в самом конце цикла сжатия пузырька, когда он становится очень маленьким с радиусом в несколько микрон. Сам цикл, связанный с периодом ультразвуковой волны, длится пятьдесят микросекунд.

Физики предположили, что яркие и столь короткие вспышки света связаны со сжатием иницируемой от центра пузырька сферической ударной волны, иницируемой от стенки пузырька и разогнанной к этому центру до больших скоростей.

Период сжатия и расширения пузырька состоит из 4-х стадий [3, 4]: первая – относительно медленное расширение (рис.1). Вторая стадия – медленное сжатие; третья стадия – сжатие с огромными скоростями (несколько километров в

секунду), когда инициируется внутрь сферическая ударная волна. Четвертая стадия – концентрация и отражение этой ударной волны от центра. В четвертой, очень короткой стадии, газ в очень малой окрестности центра микропузырька становится очень плотным и горячим, поскольку здесь происходит огромная концентрация энергии за счет кинетической энергии акустического генератора. Согласно теоретическим оценкам, температура в этой точке достигает  $T = 10^6$ °C, а плотность вещества в несколько раз превышает плотность воды. В момент схлопывания кавитационного пузырька наблюдается его слабое свечение (рис.1). Таким образом, вещество ионизировалось, а при возвращении в исходное состояние накопленная энергия высвобождалась в виде света. При этом вспышка длится от 1/20 до 1/1000 сек. Интенсивность света зависит от количества газа в пузырьке: если газ в пузырьке отсутствует, то свечение не возникает. Световое излучение пузырька очень слабое и становится видимым при усилении или в полной темноте.

### Однопузырьковая и многопузырьковая сонолюминисценция

Известно, что существуют две разновидности сонолюминисценции: однопузырьковая и многопузырьковая. Различие между ними состоит в динамике процесса схлопывания.

Рассмотрим один сферический пузырек. Если имеет место сферическая симметрия (сжимающие силы симметричны), тогда пузырек будет схлопываться, сохраняя сферичность.

При ускорении процесса схлопывания пузырька возникают различного рода неустойчивости, которые, в конечном счете, нарушают сферичность пузырька. В результате движение жидкости из строго радиального превратится в сильно турбулизированное. В этом случае, если в сферическом случае вся работа сжимающих сил уходила на нагрев паров в пузырьке, то в случае неустойчивости работа затрачивается на турбулентность, т.е. на кинетическую энергию потоков жидкости. Следовательно, эффективность нагрева паров определяется тем временем, в течение которого пузырек остается сферическим.

В случае однопузырьковой сонолюминисценции при схлопывании пузырька нагрев может осуществляться вплоть до температур порядка  $T = 50\,000$  K.

В случае многопузырьковой сонолюминисценции экспериментально определенные значения температур составляют порядка  $T = 5\,000$  K.

Следует подчеркнуть, что давление при захлопывании особенно велико при кавитации на низких частотах в обезгаженной жидкости с малым давлением насыщенного пара.

Следует отметить, что ультразвук – не самый лучший способ создания интенсивной сонолюминисценции. Гораздо более эффективнее применение кавитационных механических генераторов. Ультразвук имеет низкий КПД, а механические роторные генераторы могут иметь КПД до 40% и выше [7].

### Экспериментальная установка по исследованию ультразвукового термояда

В работе [2] представлена схема эксперимента по обнаружению следов термоядерной реакции при сонолюминисценции. На рис.2 приведена схема эксперимента.

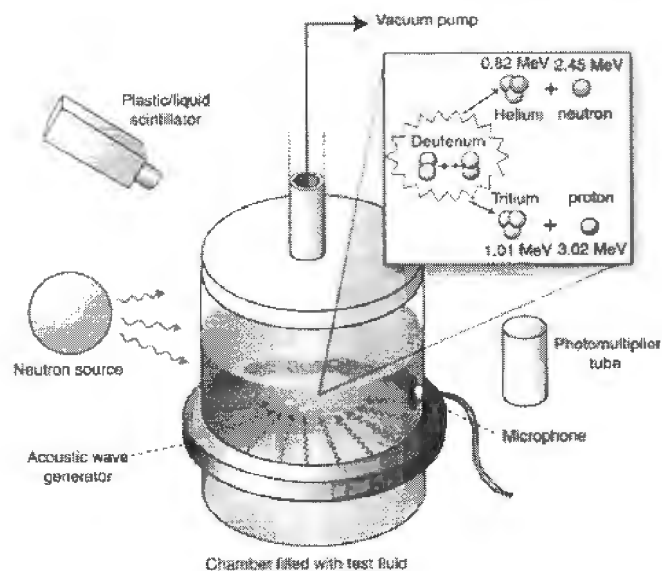


Рис. 2. Схема эксперимента по обнаружению следов термоядерной реакции при сонолюминисценции.

Основные элементы установки следующие: цилиндрическая емкость с жидкостью; излучаемая по периметру установки ультразвуковая волна; импульсный источник нейтронов; сцинтиллятор, фотоэлектронный умножитель.

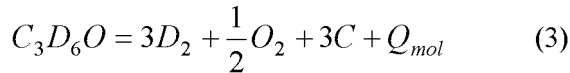
В эксперименте использована не вода, а органические жидкости (ацетон –  $C_3H_6O$  и дейтерированный ацетон –  $C_3D_6O$ ). Считается, что данные жидкости обладают свойством создавать растяжение в жидкости, что в свою очередь позволяет работать с амплитудами звуковой волны гораздо большими, чем для воды. Теоретическое обоснование пузырькового термояда приведено в целом ряде работ академика Р.И.Нигматулина

с сотрудниками, в частности в [5].

Использовался оригинальный метод зарождения пузырьков. Обычно увеличивается амплитуда звуковой волны до той отметки, когда звуковое давление с фазы растяжения само начинает порождать кавитационные пузырьки. В данной установке амплитуда звуковой волны принималась докритической, а пузырьки рождались за счет облучения 14 МэВ-нейтронами, получаемыми из внешнего источника в виде коротких импульсов.

В процессе эксперимента осуществлялась многопузырьковая сонолюминисценция, о чем свидетельствуют фотографии кавитационной области, где возникало порядка 1000 отдельных пузырьков.

В работе Р.И. Нигматулина [5] при построении модели пузырькового термояда используются процессы диссоциации дейтерированного ацетона с молекулярным весом  $M = 64$ :



где  $Q_{mol} = 3,48 \cdot 10^6$  j/кг;

$$D_2 = D + D + Q_D, \text{ где } Q_D = 111 \cdot 10^6 \text{ j/кг}; \quad (4)$$

$$O_2 = O + O + Q_0, \text{ где } Q_0 = 15,6 \cdot 10^6 \text{ j/кг}; \quad (5)$$

$$C_3D_6O = 6D + O + 3C + Q_{dis}; \quad (6)$$

$$Q_{dis} = Q_{mol} + \frac{12}{64}Q_D + \frac{16}{64}Q_0 = 28,2 \cdot 10^6 \text{ j/кг} \quad (7)$$

При этом  $\gamma_G = 1,125$  (пары);  $\gamma = 1,667$  (одноатомный газ).

В дальнейшем при пузырьковом термояде осуществляются процессы ионизации диссоциированного газа [5]:

$$\varepsilon_d^{(ch)} = \varepsilon_{do}^{(ch)} + \varepsilon_i^{(ch)}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon_i^{(ch)}$  – энергия ионизация.

Энергия ионизации определяется следующим образом:

$$\varepsilon_i^{(ch)} = \sum_K v_K x_K R_K T_K = \frac{36}{64} R_c \sum_{j=1}^6 x_{c_j} T_{c_j} + \quad (9)$$

$$+ \frac{12}{64} \sum_{j=1}^6 x_{c_j} T_{c_j} + \frac{12}{64} R_D x_{D1} T_{D1} + \frac{16}{64} R_O \sum_{j=1}^8 x_{o_j} T_{o_j}$$

С учетом молекулярного веса жидкости  $C_3D_6O$  можно записать:

$$M_C = 12 \times 3 = 36 \quad \left( v_C = \frac{36}{64} \right) - \text{углерод};$$

$$M_D = 2 \times 6 = 12 \quad \left( v_D = \frac{12}{64} \right) - \text{дейтерий};$$

$$M_O = 16 \times 1 : z = 16 \quad \left( v_C = \frac{16}{64} \right) - \text{кислород}.$$

Выражение для  $T_K$  записывается в виде:

$$T_K = 11 - 800ev. \quad (10)$$

Здесь введены следующие параметры:

$K = d_10; C1, C2, C3, C4, C5, C6; D1; 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08.$

Число электронных уровней:  $z = 15.$

Запишем выражение для  $Q_{ion}$ :

$$Q_{ion} = 7,66 \cdot 10^9 \text{ j/кг}. \quad (11)$$

Кинетика термоядерного синтеза:

$$D + D \rightarrow \begin{cases} {}^3He + n & (\approx 0,5) \\ T + p & (\approx 0,5) \end{cases}$$

Интенсивность эмиссии нейтронов:

$$J = \frac{1}{2} n^2 \langle \sigma v \rangle, \quad (12)$$

где  $n$  – концентрации атомов  $D(CO(CD_3)_2).$

Число эмитированных нейтронов:

$$N = \int \int \int j \cdot dV dt. \quad (13)$$

На рис.3 приводится график кинетики термоядерного синтеза.

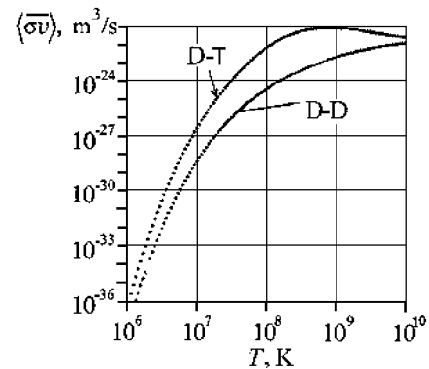


Рис. 3. График кинетики термоядерного синтеза.

### Детектирование следов термоядерной реакции

На рис.2 условно показаны два канала реакции слияния 2-х дейтронов: а) превращение в ядро гелия-3 плюс нейтрон энергией 2,45 МэВ; б) превращение в тритий плюс протон.

В 1-м канале гелий отлавливать трудно, а вот нейтроны отлавливать достаточно легко, поскольку они являются достаточно проникающим излучением.

Во 2-м канале протоны отлавливать невозможно, а вот тритий легко обнаружить по характерному  $\beta$ -распаду.

Таким образом, мы приходим к 2-м спосо-

бам:

- поиск нейтронов, рожденных в сонолюминисцентной вспышке;
- поиск следов  $\beta$ -распада трития.

Отметим, что в эксперименте [2] регистрировалась сонолюминисценция вспышки света, а также проверялось наличие «щелчка» в высокочувствительных микрофонах. Оба эти сигнала свидетельствуют о том, что процесс рождения и схлопывания пузырька в действительности имел место.

Кроме того, исследовался нейтронный сигнал. Одновременно с сонолюминисцентной вспышкой, детектировался и короткий поток нейтронов. Детектирование нейтронов осуществлялось с помощью сцинтиллятора (органического или жидкостного). Вследствие того, что сцинтиллятор мог срабатывать как от гамма-квантов, так и от нейтронов, использовалась методика «дискриминатора по профилю импульса», которая отбирала исключительно нейтроны.

Для того, чтобы отделить исходные 14 МэВ-нейтроны, которые рождали пузырьки (и к термоядерной реакции отношение не имели) от 2,45 МэВ-нейтронов нейтронов, рожденных в ходе термоядерной реакции  $D + D = He^3 + n$ , осуществлялся анализ энергетического спектра нейтронного импульса.

3-м сигналом, измеряемым в эксперименте, была тритиевая активность. Проверка на тритиевую активность осуществляется следующим образом: по окончании эксперимента через 7 - 12 часов из объема брался 1 см<sup>3</sup> жидкости и исследовался на предмет  $\beta$ -излучения от распада трития в области энергий электронов от 5 до 18 КэВ.

Следует отметить, что одной из перспективных областей применения термоядерного реактора может стать его использование в качестве очень компактного, экономичного и управляемого источника нейтронов. Он может быть использован в системах обнаружения взрывчатых веществ, контроля багажа и т.п.

Следует подчеркнуть, что с первого дня возникновения теории пузырькового термояда, она подверглась критике, как со стороны физиков, так и ученых других специальностей. Мы здесь не будем анализировать критические выступления физиков, однако отметим следующее: как бы авторитетны не были оппоненты, физические процессы, протекающие в пузырьках при сонолюминисценции изучены пока недостаточно, что не позволяет оппонентам с порога отмечать подобное результаты.

## Применение акустической кавитации в технологии обезвреживания жидких радиоактивных отходов. Матричные материалы

Переработка жидких радиоактивных отходов направлена на решение двух главных задач: очистки основной массы отходов от радионуклидов и концентрирования последних в минимальном объеме.

Сравнение составов радиоактивных отходов и пород земной коры показывает плохую корреляцию. Нереально найти геохимически совместимый с радиоактивными отходами тип горной породы. Решение проблемы значительно облегчает существование методов разделения смеси жидких радиоактивных отходов, разработанных в Радиовом институте и реализуемых в настоящее время в ПО «Маяк». Они позволяют выделить из смеси элементов радиоактивных отходов отдельные близкие по своим геохимическим характеристикам, а именно: щелочные и щелочно-земельные элементы; галогениды; редкоземельные элементы; актиниды.

Для этих групп элементов можно попытаться найти породы и минералы, перспективные для связывания.

Существующие разработки МАГАТЭ рекомендуют захоронение отвержденных радиоактивных отходов в стабильных блоках земной коры. Матрицы должны минимально взаимодействовать с вмещающей породой и не растворяться в поровых и трещинных растворах.

Требования, которым должны удовлетворять матричные материалы для связывания осколочных радионуклидов, актинидов можно сформулировать следующим образом:

- способность матрицы связывать и удерживать в виде твердых растворов возможно большое число радионуклидов и продуктов их распада в течение длительного (по геологическим масштабам) времени;
- быть устойчивым материалом по отношению к процессам физико-химического выветривания в условиях захоронения (длительного хранения);
- обладать термической устойчивостью при высоких содержаниях радионуклидов;
- обладать комплексом физико-механических свойств, которые необходимо иметь любому матричному материалу для обеспечения процессов транспортировки, захоронения, в том числе:
  - механической прочностью;
  - высокой теплопроводностью;

- малыми коэффициентами теплового расширения;
- устойчивостью к радиационным повреждениям;
- иметь простую технологическую схему производства;
- производится из исходного сырья, сравнительно низкой стоимости.

Современные матричные материалы подразделяются по своему фазовому состоянию на стеклообразные (боросиликатные и алюмофосфатные стекла) и кристаллические – как полиминеральные (синроки), так и мономинеральные (цирконий-фосфаты, титанаты, циркоалюмосиликаты и т.п.).

Традиционно для иммобилизации радионуклидов использовались стекольные матрицы (боросиликатные и алюмофосфатные по составу). Эти стекла по своим свойствам близки к алюмосиликатным, при этом в первом случае алюминий заменен бором, а во втором – крем-

нийфосфором. Эти замены вызваны необходимостью снижения температуры плавления расплавов и уменьшения энергоемкости технологии. В стекольных матрицах надежно удерживаются 10–13 масс % элементов радиоактивных отходов.

В конце 70-х годов XX столетия были разработаны первые кристаллические матричные материалы – синтетические горные породы (синрок). Эти материалы состоят из смеси минеральных твердых растворов на основе титанатов и цирконатов и гораздо более устойчивы к процессам выщелачивания, чем стекольные матрицы.

Подчеркнем, что стеклование радиоактивных отходов с последующим хранением стекольных матриц в специальных хранилищах является пока единственным методом промышленного обезвреживания радионуклидов.

В таблице 1 представлены характеристики некоторых матричных материалов.

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики матричных материалов.

| № п/п | Свойства                                                   | (B,Si) – стекло | (Al,P) – стек-ло | Синрок | NZP | Глины |
|-------|------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|--------|-----|-------|
| 1.    | Способность фиксировать радионуклиды и продукты их распада | +               | +                | +      | +   | –     |
| 2.    | Устойчивость к выщелачиванию                               | +               | +                | ++     | ++  | –     |
| 3.    | Термоустойчивость                                          | +               | +                | ++     | ++  | –     |
| 4.    | Механическая прочность                                     | +               | +                | ++     | –   | –     |
| 5.    | Стойкость к радиационным повреждениям                      | ++              | ++               | +      | +   | +     |
| 6.    | Устойчивость при размещении в породах земной коры          | –               | –                | ++     | –   | +     |
| 7.    | Технология производства                                    | +               | –                | –      | –   | +     |
| 8.    | Стоимость исходного сырья                                  | +               | +                | –      | –   | ++    |

В таблице 1 свойства матричных материалов обозначены: ++ – очень хорошие; + – хорошие. В колонке NZP подразумеваются фазы фосфатов циркония с общей формулой



где  ${}^{\text{I}}\text{A}_x {}^{\text{II}}\text{B}_y {}^{\text{III}}\text{K}_z {}^{\text{IV}}\text{M}_v {}^{\text{V}}\text{C}_w$  – элементы I–V групп таблицы Менделеева.

В строке 7 подразумевается технология производства: + – простая; – – сложная. В строке 8 подразумевается исходное сырье: ++ – дешевое; + – среднее; – – дорогое.

Анализ таблицы 1 показывает, что матричных материалов, удовлетворяющих всем сформулированным требованиям нет. Стекла и кристаллические матрицы (синрок и, возможно, насикон) являются наиболее приемлемыми по комплексу физико-химических и механических

свойств, однако, стоимость как производства, так и исходных материалов, относительная сложность технологической схемы ограничивают возможность широкого применения синрока для фиксации радионуклидов. Кроме того, устойчивость стекол недостаточна для захоронения в условиях земной коры без создания дополнительных защитных барьеров.

Усилия ученых-экспериментаторов сосредоточены на проблемах, связанных с поиском новых модификаций кристаллических матричных материалов, более пригодных для захоронения радиоактивных отходов в породах земной коры.

Прежде всего, в качестве потенциальных матриц-фиксаторов радиоактивных отходов были выдвинуты твердые растворы минералов. Известные изоморфные замещения в минералах

осуществляются, главным образом, по группам элементов таблицы Д.И.Менделеева:

- в полевых шпатах:  $\text{Na} \rightarrow \text{K} \rightarrow \text{Rb}$ ;  
 $\text{Ca} \rightarrow \text{Sr} \rightarrow \text{Ba}$ ;  $\text{Na} \rightarrow (\text{Sr}, \text{Ba})$ ;
- в оливинах:  $\text{Mn} \rightarrow \text{Fe} \rightarrow \text{Co}$ ;
- в фосфатах:  $\text{Y} \rightarrow \text{La} \dots \text{Lu}$  и т.п.

Таким образом, задача состоит в том, чтобы среди природных минералов с высокой изоморфной емкостью найти твердые растворы, которые способны концентрировать в себе указанные выше группы элементов радиоактивных отходов. В таблице 2 приведены некоторые ми-

нералы – потенциальные матрицы для размещения в них радионуклидов в качестве матричных могут применяться как главные, так и акцессорные минералы.

В плане теории одним из наиболее общих подходов к проблеме послужила разработка концепции фазового и химического соответствия матрицы – фиксатора радиоактивных отходов вмещающим породам земной коры. В соответствии с концепцией матрица должна находиться в состоянии термодинамического равновесия с вмещающими породами.

**Таблица 2.** Минералы – потенциальные концентраторы элементов радиоактивных отходов.

| № п/п                                    | Минерал      | Формула                                                                                 | Элементы РАО, изоморфно фиксируемые в минералах |
|------------------------------------------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| <b>Главные породообразующие минералы</b> |              |                                                                                         |                                                 |
| 1.                                       | Полевой шпат | $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca}) (\text{Al}, \text{Si}) 4\text{O}_8$                   | Ge, Rb, Sr, Ag, Cs, Ba, La, Eu                  |
| 2.                                       | Нефелин      | $(\text{Na}, \text{K}) \text{AlSiO}_4$                                                  | Na, K, Rb, Cs, Ge                               |
| 3.                                       | Содалит      | $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{Cl}_2$                             | Na, K, Rb, Cs, Ge, Br, I, Mo                    |
| 4.                                       | Оливин       | $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$                                                  | Fe, Co, Ni, Ge                                  |
| 5.                                       | Пироксен     | $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{Si}_2\text{O}_6$                                         | Na, Al, Ti, Cr, Fe, Ni                          |
| 6.                                       | Цеолиты      | $(\text{Na}, \text{Ca})[(\text{Al}, \text{Si})_n\text{O}_m]k \cdot x\text{H}_2\text{O}$ | Co, Ni, Rb, Sr, Cs, Ba                          |
| <b>Акцессорные минералы</b>              |              |                                                                                         |                                                 |
| 7.                                       | Перовскит    | $(\text{Ce}, \text{Na}, \text{Ca})_2(\text{Ti}, \text{Nb})_2\text{O}_6$                 | Sr, Y, Zr, Ba, La, ..., Py, Th, U               |
| 8.                                       | Апатит       | $(\text{Ca}, \text{REE})_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{OH})$                         | Y, La, ..., Dy, I                               |
| 9.                                       | Момацит      | $(\text{REE})\text{PO}_4$                                                               | Y, La, ..., Dy, Th                              |
| 10.                                      | Сфен         | $(\text{Ca}, \text{REE})\text{TiSiO}_5$                                                 | Mn, Fe, Co, Ni, Sr, Y, Zr, Ba, La, Dy           |
| 11.                                      | Цирконолит   | $\text{CaZrTi}_2\text{O}_7$                                                             | Sr, Y, Zr, La, ..., Dy, Zr, Th, U               |
| 12.                                      | Циркон       | $\text{ZrSiO}_4$                                                                        | Y, La, ..., Dy, Zr, Th, U                       |

Для минимизации диффузии радионуклидов из матрицы в окружающую среду она по своему химическому и фазовому составу должна быть максимально близка к породам места захоронения. Щелочные и щелочноземельные элементы можно размещать в минералах группы каркасных алюмосиликатов, а радионуклиды группы редкоземельных элементов, актинидов – в акцессорных минералах.

Следует отметить, что для создания и прогноза поведения минеральных матричных материалов в условиях длительного нахождения в породах, необходимо рассчитывать реакции в системе матрица – вмещающая порода, для чего необходимо знать их термодинамические свойства.

Заметим, что в породах все минералы являются твердыми растворами, среди них наиболее распространены каркасные алюмосиликаты, которые составляют около 60% объема земной коры.

Надежной основой термодинамических моделей служит только экспериментальное определение равновесий минералов – твердых

растворов.

Одной из важнейших термодинамических характеристик твердых растворов является интегральная избыточная энергия смещения, которая может быть рассчитана из данных исследования реакций ионного обмена с водно-солевыми флюидами.

Сорбционные методы предполагают поглощение радионуклидов твердой фазой по любому механизму: адсорбция, ионный обмен, сокристаллизация, окклюзия, адгезия и т.п.

Для осуществления сорбционного извлечения радионуклидов необходимо наличие твердой фазы, происхождение которой при сорбции и статических условиях может быть различным: она может присутствовать в отходах, вводится в виде готовых сорбентов или образовывается в результате химических реакций.

При содово-известковом умягчении в осадок выпадают карбонат кальция и гидроксид магния, которые служат коллекторами в основном для радиостронция. Стронций удаляется сокристаллизацией с карбонатом кальция. Поэтому согласно закону Дернера-Хоскинса, ко-

личество удаляемого стронция пропорционально выводимой жесткости (количеству кальция, переведенному в твердую фазу).

Использование содово-известкового процесса позволяет наряду со  $^{90}\text{Sr}$  удалять и другие изотопы главным образом изотопы РЗЭ и  $^{95}\text{Zr}/^{95}\text{Nb}$ . Их содержание после осаждения  $\text{CaCO}_3$  снижается примерно на порядок.

### Применение процесса акустической кавитации для получения дисперсного наполнителя $\text{CaCO}_3$

Использование местных материалов в технологических процессах очистки жидких радиоактивных отходов связано с получением дисперсных наполнителей, например,  $\text{CaCO}_3$ .

Использование в качестве наполнителя  $\text{CaCO}_3$  связано с предварительным получением малых частиц  $\text{CaCO}_3$ , имеющих размеры 50-60 нм. При этом наполнитель  $\text{CaCO}_3$  одновременно является зародышеобразователем в процессах кристаллизации матрицы.

В коллоидной химии принята следующая

классификация дисперсных систем в зависимости от размеров частиц дисперсной фазы:

- молекулярно-дисперсные – менее 1 нм;
- высокодисперсные –  $1 \div 100$  нм;
- среднедисперсные –  $100 \text{ нм} \div 10 \text{ мкм}$ ;
- грубодисперсные – более 10 мкм.

В технике известны различные методы получения ультрадисперсных систем, которые принято подразделять на 2 группы: физические и химические.

Здесь процесс акустической кавитации используется для получения высокодисперсного нанонаполнителя  $\text{CaCO}_3$ , для чего используется роторно-кавитационный генератор.

На рис.4 представлена конструктивная схема роторно-кавитационного генератора. Привод роторно-кавитационного генератора осуществляется от электродвигателя. Ротор, как правило, имеет цилиндрическую форму и выполняется монолитным, полым либо наборным.

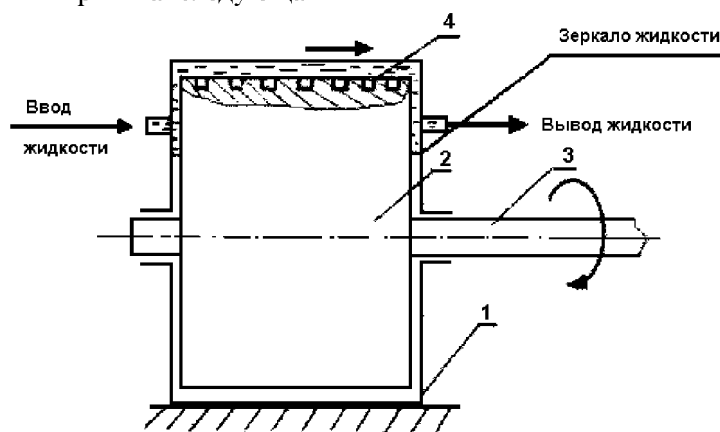


Рис.4. Конструктивная схема роторно-кавитационного генератора:  
1 – статор; 2 – ротор; 3 – вал; 4 – углубления для усиления кавитации.

В генераторе обеспечиваются условия благоприятные для кавитации при торможении вращающейся жидкости, а также обеспечения резонансных усилений звуковых колебаний, возникающих в потоке жидкости [8].

При захлопывании сферической полости пузырька давление в ней резко возрастает, как при взрыве, что приводит к излучению импульса сжатия. В результате разрушение и диспергирование твердых тел обуславливается ударами при захлопывании полостей и микропотоками вблизи пузырьков.

Данный процесс акустической кавитации позволяет получить высокодисперсный напол-

нитель  $\text{CaCO}_3$  [9].

### Заключение

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Акустическая кавитация в настоящее время находит все большее применение для создания новых и совершенствования известных технологических процессов.
2. Следует отметить, что холодный термоядерный синтез с использованием акустической кавитации и сонолюминисценции изучен пока недостаточно, что не позволяет оппонентам с порога отметить полученные

в экспериментах результаты.

3. Одним из перспективных областей применения процесса холодного термоядерного синтеза может быть его использование в качестве очень компактного, экономичного и управляемого источника нейтронов.
4. Акустическая кавитация находит все большее применение в технологии обезвреживания жидких радиоактивных отходов, при этом использование местных материалов в технологических процессах очистки жидких радиоактивных отходов связано с получением высокодисперсных нанонаполнителей.

### Список литературы

1. Нигматулин Р.И. Кавитационный кластер паровых микропузырьков как нанотермоядерная бомба. – Доклад на Конференции по механике сплошной среды, посвященной 100-летию академика Л.И.Седова. – М.: РАН, 2007.
2. Taleyarkhan R.P. et al. Evidence for nuclear emission during acoustic cavitation. – Science, vol.295, 2002, p.1868-1873.
3. Нигматулин Р.И., Шагапов В.Ш., Лэхи Р.Т. Метод сверхсжатия газового пузырька в жидкости с помощью непериодического колебания давления с умеренной амплитудой. – Доклады РАН, том 40, №3, 1995, с.122-126.
4. Нигматулин Р.И., Гамалтдинов И.К., Шагапов В.Ш. Эволюция волн давления в жидкости, содержащей зону жидкости с пузырьками. – Известия РАН. Механика жидкости и газа, №3, 2001, с.133-142.
5. Nigmatulin R., Akhatov I., Topolnikov A., Bolotnova R., Lahey Jr.R., Taleyarkhan R. The Theory of supercompression of Vapor Bubbles and Nano-Scale Thermonuclear Fusion. – Physics of Fluids, vol.17, 107106, 2005, p.1-31.
6. Taleyarkhan R., Block R., Lahet Jr.R., Nigmatulin R.I. Nuclear Emission During Self-Nucleated Cavitation. – Physics Review Letters, vol.96034301, 2006.
7. Пухлий В.А. Вихревые теплогенераторы и акустическая кавитация. – В сб.: Научные труды СТУЭИП, вып.1(29), 2009, с.
8. Пухлий В.А., Пухлий Ж.А., Ковалев Н.И. Резонансы в физике. Учебное пособие в 2-х томах. Том 2. Теория и приложения в технике. – Севастополь: Изд-во «Черкасский ЦНТЭИ», 2012. – 440 с.
9. Пухлий В.А., Береза Б.П. Акустическая кавитация и ее применение в ядерной энергетике. – Материалы на 10-й Международной научно-практической конференции по атомной энергетике «Безопасность, эффективность, ресурс ЯЭУ». Севастополь 2-7 октября 2012 г. – Севастополь, 2012,

### References

1. Nigmatulin R. I. Cavitation cluster of steam microvials as nanothermonuclear a bomb. – The report at Conference on mechanics of the continuous environment devoted to the 100 anniversary of academician L.I.Sedova. – M: Russian Academy of Sciences, 2007.
2. Taleyarkhan R.P. et al. Evidence for nuclear emission during acoustic cavitation. – Science, vol.295, 2002, p.1868-1873.
3. Nigmatulin R. I, Shagapov V. SH, Lehi R. T. A method of supercompression of a gas vial in a liquid by means of acyclic fluctuation of pressure with moderate amplitude. – Reports of the Russian Academy of Sciences, volume 40, №3, 1995, p.122-126.
4. Nigmatulin R. I, Gamaltdinov I.K., Shagapov V. SH. Evolution of waves of pressure in a liquid containing a zone of a liquid with vials. – News of the Russian Academy of Sciences. Mechanics of a liquid and gas, №3, 2001, p.133-142.
5. Nigmatulin R., Akhatov I., Topolnikov A., Bolotnova R., Lahey Jr.R., Taleyarkhan R. The Theory of supercompression of Vapor Bubbles and Nano-Scale Thermonuclear Fusion. – Physics of Fluids, vol.17, 107106, 2005, p.1-31.
6. Taleyarkhan R., Block R., Lahet Jr.R., Nigmatulin R.I. Nuclear Emission During Self-Nucleated Cavitation. – Physics Review Letters, vol.96034301, 2006.
7. Pukhliy V. A. Vortical termogenerator and acoustic cavitation. – In Scientific magazine.: Proceedings SNUJEP, res.1 (29), 2009, p.
8. Pukhliy V. A, Pukhliy Z.A., Kovalev N.I. Resonance in the physicist. The manual in 2 volumes. Volume 2. The theory and applications in the technician. – Sevastopol: Publishing house «Cherkassk ZNTEI», 2012. – 440 p.
9. Pukhliy V. A, Bereza B.P. Acoustic's cavitation and its application in nuclear power. - Materials at 10th International scientifically-practical conference on atomic engineering «Safety, efficiency, resource». Sevastopol on October, 2-7nd, 2012 - Sevastopol, 2012

УДК 621.039.514

## Исследование температур в топливных таблетках ТВЭЛ с учетом изменения теплопроводности уран-гадолиниевого топлива $\text{UO}_2+\text{Gd}_2\text{O}_3$ в зависимости от массового содержания выгорающего поглотителя в топливной композиции

В.В. Шаповаленко<sup>1</sup>, Г.Я. Мерзликин<sup>2</sup>, С.Ю. Польшаков<sup>3</sup><sup>1,2</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>shapovalenkovita@rambler.ru, <sup>2</sup>merzlikinG@mail.ru, <sup>3</sup>stavr.polshakov@mail.ru

Статья поступила 04.09.2017 г.; после доработки 14.09.2017 г.

### Аннотация

Выполнены расчеты температур на оси и поверхности топливных таблеток в ТВЭЛ с уран-гадолиниевым топливом ( $\text{UO}_2+\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) в зависимости от массового содержания выгорающего поглотителя в топливной композиции.

Ключевые слова: уран-гадолиниевое топливо, выгорающий поглотитель, теплопроводность, ВВЭР-1000.

## Study the temperatures in the fuel tablets of the fuel rod taking into account changes in the thermal conductivity of uranium-gadolinium fuel $\text{UO}_2+\text{Gd}_2\text{O}_3$ depending on the mass content of the burnable absorber in the fuel composition

V.Shapovalenko<sup>1</sup>, G.Merzlikin<sup>2</sup>, S. Polshakov<sup>3</sup><sup>1,2</sup> Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, <sup>1</sup>shapovalenkovita@rambler.ru, <sup>2</sup>merzlikinG@mail.ru, <sup>3</sup>stavr.polshakov@mail.ru

Received 04.09.2017 y.; received in final form 14.09.2017 y.

### Abstract

Temperatures calculations on the axis and the surface of the fuel pellets in the fuel rods with uranium-gadolinium fuel ( $\text{UO}_2+\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) depending on the mass content of the burnable absorber in the fuel composition.

Keywords: uranium-gadolinium fuel, burnable absorber, the thermal conductivity, VVER-1000 reactor.

### Введение

Впервые уран-гадолиниевое топливо стали использовать за рубежом в активных зонах кипящих реакторов BWR, затем в легководных реакторах PWR, гораздо позже в России на АЭС с реакторами ВВЭР-1000.

Введение выгорающего поглотителя в виде окиси гадолиния ( $\text{Gd}_2\text{O}_3$ ) непосредственно в топливные таблетки позволяет выравнять тепловыделения по радиусу тепловыделяющей,

не уменьшает количество ТВЭЛов в активной зоне, следовательно, не увеличивает линейное энерговыделение ТВЭЛов, отпадает необходимость извлечения ТВЭЛов из облученных ТВС. Гадолиний имеет высокое поперечное сечение захвата нейтронов и не вызывает образования нежелательных дочерних продуктов, обладает хорошей совместимостью с  $\text{UO}_2$ . Добавка сильного выгорающего поглотителя  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  обеспечивает компенсацию начального избытка реактивности, уменьшение начальной концентрации

борной кислоты и позволяет осуществить прогнозируемое улучшение потенциальных характеристик энерговыделения в течение всей кампании. Однако наличие выгорающего поглотителя в топливной матрице приводит к снижению её теплопроводности, а также к значительным деформациям топливной таблетки – всё это накладывает ограничения на предельные тепловые потоки вследствие ограничения максимальных температур ядерного топлива на оси твэла.

### Постановка цели и задачи

Задачами работы является исследование изменения температур ядерного топлива с учетом изменения теплопроводности уран-гадолиниевого топлива в зависимости от массового содержания выгорающего поглотителя в топливной композиции.

### Описание исследования

Исследования выполнены при исходных данных:

|                                                          |                                                 |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Характеристика ВВЭР-1000                                 |                                                 |
| Тепловая мощность ядерного реактора, МВт                 | 3000                                            |
| Давление теплоносителя в ядерном реакторе, МПа           | 15,7                                            |
| Температура теплоносителя на входе в активную зону, °C   | 290                                             |
| Температура теплоносителя на выходе из активной зоны, °C | 320                                             |
| Высота активной зоны, м                                  | 3730                                            |
| Вид ядерного топлива                                     | UO <sub>2</sub> +Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |
| Материал оболочки твэла                                  | Циркониевый сплав Э-110                         |

Расчеты теплопроводности уран-гадолиниевого топлива проводились по формуле [1]

$$\lambda_{(UO_2+Gd_2O_3)} = \frac{1}{a \cdot t + b}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°C)},$$

где  $\lambda_{(UO_2+Gd_2O_3)}$  - коэффициент теплопроводности диоксида урана с выгорающим поглотителем триоксидом гадолиния, Вт/(м·°C),

$t$  – локальная температура топлива на поверхности топливной таблетки, °C;

$a, b$  - коэффициенты, учитывающие величины массового содержания Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в составе ядерного топлива UO<sub>2</sub>+Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, значения которых указаны в таблице 1. В таблицах 2 и 3 представлены результаты расчета температур топлива для средне и максимально нагруженного твэла на поверхности и в центре топливной

таблетки при разном массовом содержании в топливе выгорающего поглотителя.

**Таблица 1.** Величины коэффициентов формулы 1

| Массовое содержание Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> в составе ядерного топлива (UO <sub>2</sub> +Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ), % | $a$                      | $b$                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 0%                                                                                                                                  | $2,327330 \cdot 10^{-4}$ | $1,180229 \cdot 10^{-1}$ |
| 3%                                                                                                                                  | $2,131412 \cdot 10^{-4}$ | $1,732423 \cdot 10^{-1}$ |
| 5%                                                                                                                                  | $1,996481 \cdot 10^{-4}$ | $2,069985 \cdot 10^{-1}$ |
| 8%                                                                                                                                  | $1,961735 \cdot 10^{-4}$ | $2,342200 \cdot 10^{-1}$ |

**Таблица 2.** Изменение температуры топлива на оси топливной таблетки UO<sub>2</sub>+Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по высоте активной зоны в зависимости от массового содержания выгорающего поглотителя для средненагруженного твэла

| Z      | Массовое содержание Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |         |         |         |
|--------|----------------------------------------------------|---------|---------|---------|
|        | 0%                                                 | 3%      | 5%      | 8%      |
| 1,865  | 484,23                                             | 501,62  | 509,33  | 519,83  |
| 1,24   | 834,43                                             | 882,08  | 902,98  | 932,68  |
| 0,62   | 1001,29                                            | 1167,48 | 1196,28 | 1238,51 |
| 0,47   | 1043,90                                            | 1212,82 | 1242,75 | 1286,88 |
| 0,37   | 1163,83                                            | 1234,00 | 1264,47 | 1309,47 |
| 0      | 1198,05                                            | 1270,50 | 1301,92 | 1348,51 |
| -0,37  | 1157,20                                            | 1227,51 | 1258,06 | 1303,12 |
| -0,47  | 1135,60                                            | 1204,70 | 1234,73 | 1278,93 |
| -0,62  | 1090,21                                            | 1156,67 | 1185,58 | 1227,91 |
| -1,24  | 812,82                                             | 860,83  | 881,91  | 911,73  |
| -1,865 | 601,70                                             | 653,28  | 676,18  | 707,16  |

**Таблица 3.** Изменение температуры топлива на оси топливной таблетки UO<sub>2</sub>+Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по высоте активной зоны в зависимости от массового содержания выгорающего поглотителя для максимально нагруженного твэла

| Z      | Массовое содержание Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |         |         |         |
|--------|----------------------------------------------------|---------|---------|---------|
|        | 0%                                                 | 3%      | 5%      | 8%      |
| 1,865  | 570,33                                             | 595,17  | 606,15  | 621,28  |
| 1,24   | 1122,45                                            | 1188,06 | 1216,57 | 1258,59 |
| 0,62   | 1566,49                                            | 1654,96 | 1692,85 | 1751,77 |
| 0,47   | 1638,63                                            | 1730,28 | 1769,44 | 1830,86 |
| 0,37   | 1672,37                                            | 1765,49 | 1805,23 | 1867,81 |
| 0      | 1729,24                                            | 1825,07 | 1865,90 | 1930,59 |
| -0,37  | 1657,13                                            | 1750,72 | 1790,69 | 1853,42 |
| -0,47  | 1619,84                                            | 1712,06 | 1751,50 | 1813,10 |
| -0,62  | 1542,16                                            | 1631,34 | 1669,60 | 1728,74 |
| -1,24  | 1082,82                                            | 1149,33 | 1178,29 | 1220,60 |
| -1,865 | 528,68                                             | 553,90  | 565,08  | 580,33  |

На рисунке 1 представлены графики температурной зависимости теплопроводности уран-гадолиниевого топлива от содержания в нем выгорающего поглотителя при температуре от 400°С до 2900°С. При исследовании графиков, следует отметить, что с увеличением температуры топлива и содержания в нем гадолиния, теплопроводность топливной композиции зна-

чительно снижается, а это в свою очередь приводит к увеличению температуры топлива. Данные выводы подтверждаются расчетами, представленными в таблице 2 и таблице 3.

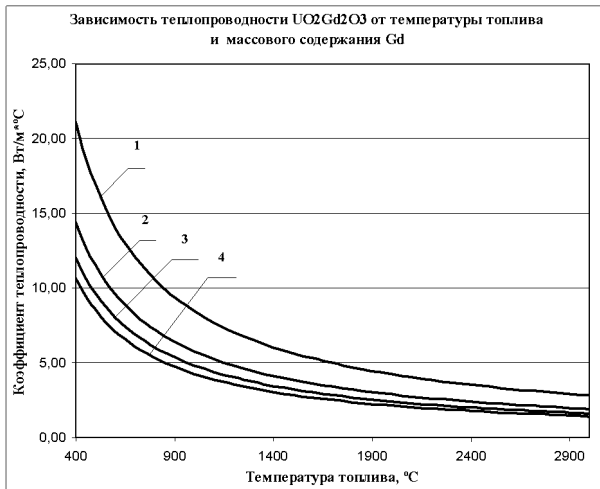


**Рис. 1.** Температурная зависимость теплопроводности уран-гадолиниевого топлива  $UO_2+Gd_2O_3$  с различным содержанием  $Gd_2O_3$ :  
1 - 0%; 2 - 3%; 3 - 5%; 4 - 8%.

При сравнении температур на оси топливной таблетки (табл.3) в координате  $Z = 0$  для максимально нагруженного твэла без выгорающего поглотителя и с выгорающим поглотителем, при содержаниях с свыше 5% наблюдается значительное превышение предельно допустимых температур топлива. Превышение предельно допустимых температур в топливе приводит к растрескиванию топливной таблетки, что неблагоприятно влияет на работу тепловыделяющего элемента и создает прецедент для повреждения оболочки твэла и возникновения кризиса теплоотдачи. Кроме того, значительное увеличение содержания выгорающего поглотителя в топливе снижает количество самого ядерного топлива, что может сказаться на длительности топливной кампании.

### Заключение

На основании полученных результатов сделаны выводы о значительном увеличении температур ядерного топлива с увеличением в нём массового содержания гадолиния.

Данные результаты исследования важны для определения предельных значений тепловых потоков с поверхности твэла, оптимизации схем расстановки твэлов с уран-гадолиниевым топливом в тепловыделяющей сборке, поиска оптимального значения массового содержания

выгорающего поглотителя в топливной композиции.

### Список литературы

1. Горский И.В. Уран-гадолиниевое окисное топливо. Ч.1- Основные свойства  $Gd_2O_3$  и  $UO_2+Gd_2O_3$ . /Атомная техника за рубежом, 1989. – Вып. 2 - С. 3-11.
2. Горский И.В. Уран-гадолиниевое окисное топливо. Ч.2-Теплофизические свойства  $UO_2+Gd_2O_3$  и методы их измерения /Атомная техника за рубежом, 1989. – Вып. 4 – С. 6-15.
3. M. Schlieck Technical note Optimized. Gadolinia concepts for advanced in-core fuel management in PWRs. / M. Schlieck, H.D. Berger, A. Neufert// Nuclear Engineering and Design 205. – 2001. - P.191–198.
4. S.G.Popov Thermodynamic analysis of uranium-gadolinium fuel stability at high temperatures / S.G.Popov, V.N.Proselkov, V.A.Lysenko // Atomic Energy. - 2011.- Vol. 110, No. 4. –P.188–194.

### References

1. Gorsky, I. V. Uranium-gadolinium oxide fuel. P.1 - Basic properties of  $Gd_2O_3$  and  $UO_2+Gd_2O_3$ . / Atomnaya tekhnika za rubezhom . – 1989. - Issue No. 2. - P. 3-11.
2. Gorsky, I. V., Uranium-gadolinium oxide fuel. P.2- Thermal properties of  $UO_2+Gd_2O_3$  and methods of measurement/ Atomnaya tekhnika za rubezhom . – 1989. - Issue No. 4. – P. 6-15.
3. M. Schlieck Technical note Optimized. Gadolinia concepts for advanced in-core fuel management in PWRs. / M. Schlieck, H.D. Berger, A. Neufert// Nuclear Engineering and Design 205. – 2001. - P.191–198.
4. S.G.Popov Thermodynamic analysis of uranium-gadolinium fuel stability at high temperatures / S.G.Popov, V.N.Proselkov, V.A.Lysenko // Atomic Energy. - 2011.- Vol. 110, No. 4. –P.188–194.

---

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

---

УДК 621.383.72:535.241.46

**Исследование реакции ПЗС-матрицы  
на изменение освещённости**Ю.М. Быковский<sup>1</sup>, В.А. Нурзай<sup>2</sup>, А.А. Халина<sup>3</sup>*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,  
г. Севастополь, 299053, Россия. <sup>1</sup>bym-for@mail.ru, <sup>2</sup>Mengsk777@yandex.ru, <sup>3</sup>halina.bakanov-  
dan@yandex.ru*

Статья поступила 20.11.2017 г.; после доработки 28.11.2017 г.

**Аннотация**

*В статье представлены результаты экспериментов по исследованию возможности измерения освещённости с помощью ПЗС-матрицы цифровой видеокамеры. Рассмотрена проблематика применения цифрового фотоаппарата в качестве фотометрического датчика и приведены пути решения. Произведен сравнительный анализ отклика ПЗС-матрицы при различных вариантах спектрального состава видимого освещения.*

*Ключевые слова:* ПЗС-матрица, измерение освещённости, обработка кадров.

**Research of CCD-matrix response to illuminance change**Yu.M. Bykovsky<sup>1</sup>, V.A. Nurzai<sup>2</sup>, A.A. Halina<sup>3</sup>*Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
<sup>1</sup>bym-for@mail.ru, <sup>2</sup>Mengsk777@yandex.ru, <sup>3</sup>halina.bakanov-dan@yandex.ru*

Received 20.11.2017 y.; received in final form 28.11.2017 y.

**Abstract**

*The article presents the results of experiments to research of the possibility of measuring illumination with CCD-matrix. The problems of using a digital camera as a photometric sensor are considered and solutions are presented. A comparative analysis of the CCD-matrix response for various variants of the spectral composition of visible illumination is made.*

*Keywords:* CCD matrix, illuminance measurement, frame processing.

**Введение**

Вибрация на производстве, как и в любом технологическом процессе, является неизбежным и вредным, даже опасным фактором. Измерение её параметров производится различными методами, в том числе и оптическими, в группу которых входит фотометрический метод измерения параметров вибрации, приобретающий все большее распространение.

Одним из измеряемых фотометрическим методом параметров является освещённость

вибрирующей поверхности. Для регистрации освещённости используются экспонометры, экспозиметры, люксметры и многие другие фоточувствительные приборы [1]. Все они обладают рядом недостатков, таких как: отсутствие системы фокусировки, малое быстродействие, ограниченное расстояние до объекта, усреднение показаний по всему полю измерения. Инновационным в этом плане является применение ПЗС-матрицы фотоаппарата, который, благодаря системе фокусировки и широким возможностям обработки

данных, нивелирует указанные недостатки. Применение ПЗС-матрицы ставит ряд задач по исследованию и интерпретации получаемых данных об изменении освещённости. Актуальным в этом плане является изучение отклика ПЗС-матрицы на изменение внутренних параметров съёмки фотоаппарата и различный спектральный состав освещения поверхности.

### Постановка цели научной работы

Целью исследования является проверка возможности применения ПЗС-матрицы для косвенных измерений параметров вибрации через регистрацию изменений освещённости.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- выбор разрешения камеры (18 Мп или 0,3 Мп);
- выявление влияния встроенных параметров цифрового фотоаппарата на полученные данные;
- выбор спектра источника освещения для получения наиболее точных данных об освещённости, при измерениях ПЗС-матрицей.

### Описание экспериментальной установки

Для выявления возможности применения ПЗС-матрицы цифрового фотоаппарата в качестве фоточувствительного датчика измерения освещённости была собрана экспериментальная установка, приведённая на рис. 1.

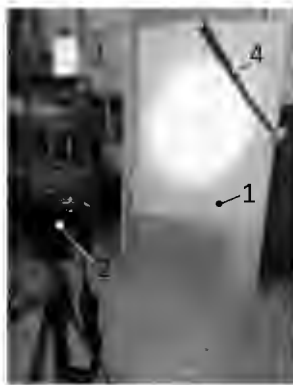


Рис. 1. Фото экспериментальной установки

В качестве объекта съёмки использовалась вертикальная матовая поверхность 1, на расстоянии 92 см от которой на штативе неподвижно размещался фотоаппарат 2 модели Canon 600D. На том же расстоянии расположена светодиодная панель (из 9 светодиодов) 3, закреплённая на поворотной штанге 4, ось вращения которой распо-

лагалась за плоскостью исследуемой поверхности на уровне объектива фотоаппарата. Свет от панели направлен в центр отражающей плоскости. Штанга со светодиодной панелью перемещалась в вертикальной плоскости в диапазоне от  $0^\circ$  до  $\approx 90^\circ$  с шагом  $5^\circ$ . При этом свет от источника всегда ориентировался в центр исследуемой области. На каждом шаге производились фотоснимки центрального участка отражающей поверхности с различным разрешением (18 Мп и 0,3 Мп), и при их последующей обработке измерялась суммарная яркость пикселей, отображающих освещённую область. Питание светодиодов осуществлялось постоянным напряжением от блока питания. Всего было использовано 4 идентичных панели со светодиодами синего, зеленого, красного и белого света. Эксперименты производились в абсолютной темноте.

### Определение погрешности измерения при различном разрешении камеры

Первой поставленной задачей было определение относительного уровня шумов в форматах кадра 18 Мп при конвертации RAW – JPG и 0,3 Мп – JPG. Шумы обусловлены наличием темнового тока в фотоприёмном элементе ПЗС – матрицы.

Темновой ток – это малый электрический ток, который протекает через фоточувствительный детектор (фотоприёмный пиксель ПЗС-матрицы) при отсутствии основного сигнала.

Для определения величины уровня шумов при двух различных разрешениях были произведены серии снимков с различной чувствительностью матрицы (величиной ISO) без доступа света к фотоприёмнику. Снимки производились в двух режимах: с включённым внутренним шумоподавлением фотоаппарата и без него. Было разработано специализированное программное обеспечение, позволяющее вычислять суммарную яркость пикселей задаваемой области кадра. На рис. 2 представлена экспериментальная зависимость величины темнового тока в относительных единицах яркости кадра от светочувствительности для исследуемой модели фотоаппарата.

Из графиков видно, что величина шумов, независимо от режима шумоподавления, при разрешении 18 Мп выше, чем при 0,3 Мп.

Погрешность рассчитывалась по формуле:

$$\varepsilon = \frac{E_{\text{шум}}}{E_{\text{MAX}}} \cdot 100\%,$$

где:  $E_{\text{MAX}}$  – максимальная яркость кадра,

$E_{\text{шум}}$  – яркость кадра при нулевой освещённости.

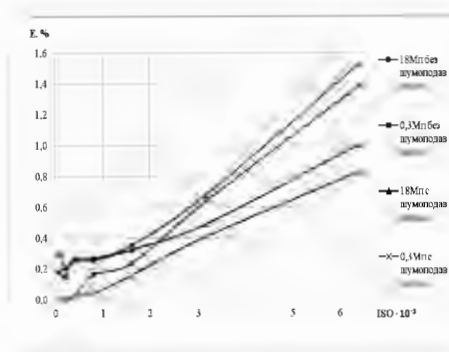


Рис. 2. Относительная погрешность при разрешении 18 Мп и 0,3 Мп

Следовательно, производя измерения освещённости в формате с малым разрешением, результаты будут получены с меньшей погрешностью, чем при тех же условиях в формате с большим разрешением. Так же предпочтительной является функция биннинга – аппаратного объединения пикселей в группы, с получением интегральных сигналов.

### Исследование влияния встроенных параметров цифрового фотоаппарата на полученные данные

Рассмотрены такие параметры фотоаппарата, как гамма-коррекция и коррекция экспозиции. Возможность учета их влияния на яркость пикселей включена в программное обеспечение, что делает его более универсальным.

Гамма-коррекция – процесс компенсации нелинейного преобразования устройства вывода. Такой тип коррекции яркости изображения используется как встроенная функция в некоторых моделях фотоаппаратов, для более точной цветопередачи монитором.

Из [2] используем формулу гамма-коррекции:

$$V_{OUT} = k \cdot V_{IN}^{(1/\gamma)}$$

Используемый фотоаппарат не производит гамма-коррекцию, следовательно, коэффициент гамма:  $\gamma = 1$ ,  $k = 1$ .

Экспокоррекция – это коррекция количества света, попадающего на ПЗС – матрицу [3].

Экспозиционное число EV – условное целое число, однозначно характеризующее экспозицию.

Зависимость освещённости от экспозиционного числа определяется выражением [4]:

$$E = \frac{K}{S} \cdot 2^{EV},$$

где:  $K$  – поправочный коэффициент;  
 $S$  – ISO (светочувствительность);

EV – экспозиционное число.

Компенсация экспозиции была отключена в настройках фотоаппарата, следовательно, EV = 0.

Был проведен отдельный эксперимент, при котором производилась съемка одной сцены с принудительным покадровым изменением экспозиционного числа. Интегральное значение яркости кадра при максимальной чувствительности принято за 100%. Результаты эксперимента по уменьшению экспозиционного числа представлены на рис. 3.



Рис. 3. Экспериментальный график зависимости яркости кадра от коэффициента коррекции экспозиции.

Видим, что освещенность кадра зависит от коррекции экспозиции по указанному закону.

### Зависимость освещённости от угла падения светового луча

С целью выбора оптимального спектра источника освещения для организации измерительного процесса следует сравнить их, по отклику ПЗС-матрицы на изменение интенсивности освещенности, вызванного изменением угла освещения. Для решения данной задачи были использованы четыре светодиодные панели, каждая из которых включала в себя 9 одноцветных светодиодов (белого, зелёного, синего и красного цветов соответственно). Эксперимент был проведён со следующими входными данными:

- Изменение угла наклона  $\varphi$  источника света относительно экрана с помощью поворотной штанги возможно в пределах от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  с шагом  $5^\circ$ .
- Постоянное напряжение питания светодиодной панели, принятой за точечный источник
- ISO – 1600.
- Режим съёмки - ручной с постоянными параметрами:

- $F = 4.5$  – диафрагменное число;
- $t = 1/125$  [с] – значение выдержки;
- ББ = 4000 [К] – баланс белого;
- без фильтра.

В качестве значащего фактора выбрана близость экспериментальных кривых изменения освещенности для различных источников освещения к теоретической, которая вычисляется по формуле [4]:

$$E = \frac{I_v}{r^2} \cos \varphi,$$

где:  $I_v$  – сила света в канделах;

$r$  – расстояние до источника света;

$\varphi$  – угол падения лучей света относительно нормали к поверхности.

В опытах применялись светодиоды следующих марок:

- белый 10003UWC (10AW4NC),  $I_v = 7$  Кд;
- синий 10003UBC (10AB4MC),  $I_v = 2$  Кд;
- зеленый 10003UGC (10AYG4SC),  $I_v = 0,5$  Кд;
- красный 10003UED-TL (10AR4UD),  $I_v = 0,7$  Кд.

Полученная зависимость освещенности от спектрального состава освещенности представлена на рис. 4.

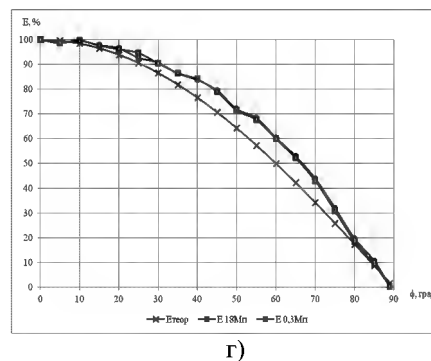
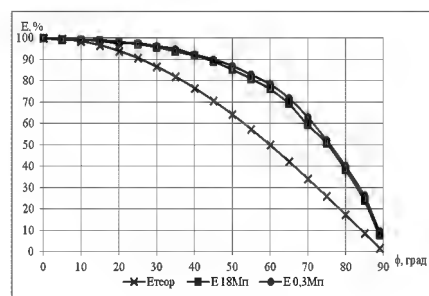


Рис. 4. Зависимость освещенности от угла падения светового луча: а) белый; б) синий; в) зеленый; г) красный.

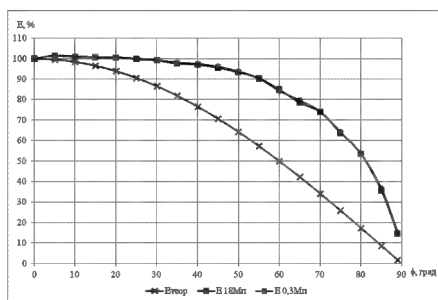
Из рисунков видно, что матрица фотоаппарата по-разному реагирует на идентичное изменение освещенности для разных спектров. Освещение в красном спектре вызывает наименьшее отклонение от теоретического графика, в то время как синий спектр вызывает наибольшее отклонение. Это вызвано особенностями восприятия основных цветов пикселями ПЗС-структуры и постобработкой изображения. Это наблюдение может быть интересным для идентификации вибрации объектов в неблагоприятных условиях. Необходимо анализировать результаты подробнее.

### Анализ результатов экспериментов

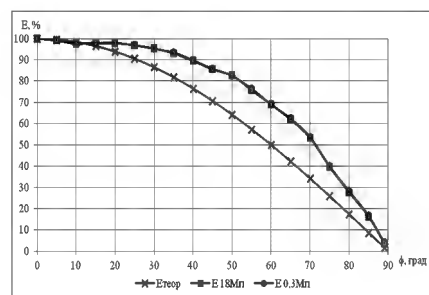
Как видно из рисунка 4, нет существенных отличий в графиках для двух форматов с большим и малым разрешением. Следовательно, исходя из объемов обработки информации и относительных уровней шумов, будем в дальнейшем рассматривать только малое разрешение (720·480). Для него были построены следующие графики для всех цветов освещения (рис.5).



а)



б)



в)

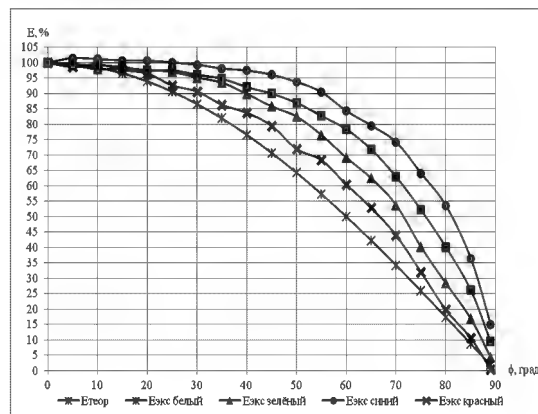


Рис. 5. Зависимость освещенности от угла для разных подсветок

Из рис. 5 видно, что наиболее близко к теоретической кривой расположен график для красного освещения. Следовательно, изменение освещённости в этой области спектра воспринимается максимально корректно, что в свою очередь делает применение именно красного цвета подсветки более целесообразным. Этот факт может быть принят во внимание при разработке алгоритма и технического решения системы измерения вибрации, происходящей соосно оптической оси объектива.

### Влияние интенсивности света на экспериментальные данные

Проанализировав графики зависимости освещённости от угла для разных подсветок, было выявлено, что экспериментальная кривая для синего цвета лежит дальше остальных от теоретической. При этом синие светодиоды имеют большую силу света, чем красные, при одинаковой силе тока. Следовательно, чтобы исключить возможность влияния интенсивности света на результаты, был произведен отдельный эксперимент. Для синей подсветки были произведены замеры освещённости при напряжении:  $U_1 = 6 \text{ В}$ ;  $U_2 = 4 \text{ В}$ ;  $U_3 = 3 \text{ В}$ . И результаты сопоставлены с кривой для красных светодиодов (рис.6).

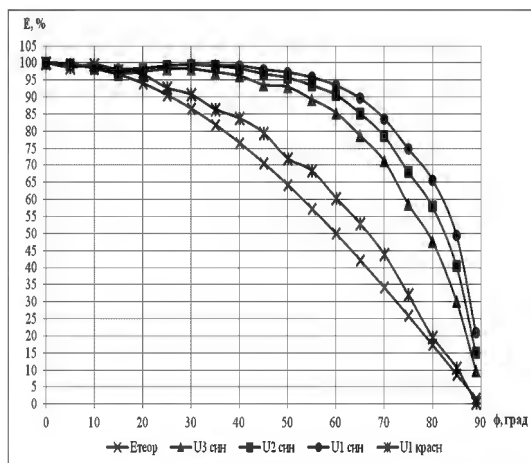


Рис. 6. Совокупный график изменения освещённости

Результаты эксперимента показали явную закономерность изменения освещённости при разной интенсивности света. Чем меньше интенсивность, тем ближе лежит экспериментальная кривая к теоретической. Но, как видно на графике, кривая зависимости освещённости от угла падения светового луча для красного цвета находится гораздо ближе, следовательно интенсивность освещения не так значима. Это еще

раз подтверждает целесообразность применения красной подсветки.

### Заключение

Результаты исследований показали возможность и целесообразность применения ПЗС–матрицы цифрового фотоаппарата в качестве фоточувствительного датчика. Было разработано специализированное программное обеспечение для расчета суммарной яркости пикселей области кадра и учтено влияние внутренних настроек фотоаппарата. Так же на основе экспериментальных данных было выявлено, что кривая изменения освещённости от красных светодиодов максимально близка к теоретической, что говорит о рациональности их применения для организации специализированной подсветки в дальнейших исследованиях.

### Список литературы

1. Козлов М.Г. Метрология и стандартизация: Учебник, СПб.: Изд-во «Петербургский ин-т печати», 2001, 372 с.
2. Игнатенко А.В. Гамма-коррекция. Открытая лекция. [Электронный ресурс] / Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа ВМК МГУ. Режим доступа: [http://courses.graphicon.ru/files/courses/imagesynt/2011/lectures/mis\\_lect05\\_11.pdf](http://courses.graphicon.ru/files/courses/imagesynt/2011/lectures/mis_lect05_11.pdf)
3. Фомин А. В. Общий курс фотографии. 3-е изд. - М.: «Легпромбытиздат», 1987, С. 75-103, 256 с.
4. Экспозиционное число [Электронный ресурс] / материал из Википедии. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Экспозиционное\\_число](https://ru.wikipedia.org/wiki/Экспозиционное_число)

### References

1. Kozlov M.G. *Metrologiya i standartizatsiya* [Metrology and standardization]: Textbook, St.P.: Petersburg Institute of Press Publ., 2001, 372p.
2. Ignatenko A.V. *Gamma-korrekcija. Otkrytaya lekcija*. [Gamma correction. Open lecture] / Electronic resource / Laboratory of Computer Graphics and Multimedia CMC MSU. URL: [http://courses.graphicon.ru/files/courses/imagesynt/2011/lectures/mis\\_lect05\\_11.pdf](http://courses.graphicon.ru/files/courses/imagesynt/2011/lectures/mis_lect05_11.pdf)
3. Fomin A. V. *Obshchij kurs fotografii*, [General course of photography] 3-d edition. – M.: «Legprombytizdat», 1987, 75-103pp., 256p.
4. *Ehkspozicionnoe chislo* [Exposure number] / Electronic resource / Wikipedia material. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure\\_value](https://en.wikipedia.org/wiki/Exposure_value)

УДК 621.039.56

## Идентификация аварийных режимов блоков ядерной энергетической установки на основе статистических и нейросетевых методов

С.А. Качур<sup>1</sup>, Н.В. Шахова<sup>2</sup>, К.П. Аникевич<sup>3</sup>, Е.Н. Давиденко<sup>4</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, [kachur\\_62@mail.ru](mailto:kachur_62@mail.ru)<sup>1</sup>, [nata\\_shachova\\_73@mail.ru](mailto:nata_shachova_73@mail.ru)<sup>2</sup>, [anikonst@mail.ru](mailto:anikonst@mail.ru)<sup>3</sup>,  
[davi-helen@yandex.ru](mailto:davi-helen@yandex.ru)<sup>4</sup>

Статья поступила 17.11.2017 г.; после доработки 20.11.2017 г.

### Аннотация

Предложен подход к идентификации нештатных и аварийных режимов блоков ядерной энергетической установки на основе дискриминантного анализа и нейронных сетей. Определен вид закона изменения параметров объекта регулирования в аварийных режимах. Проведен анализ различных методов идентификации аварийных состояний по критерию быстроедействия при необходимой точности.

**Ключевые слова:** нейронные сети, классификация с обучением, аварийный режим, ядерная энергетическая установка.

## Authentication of Malfunctions of Blocks of Nuclear Power Installation on the Basis of Statistical and Neuronet Methods

S.A. Kachur<sup>1</sup>, N.V. Shahova<sup>2</sup>, K.P. Anikevich<sup>3</sup>, E.N. Davidenko<sup>4</sup>

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [kachur\\_62@mail.ru](mailto:kachur_62@mail.ru)<sup>1</sup>, [nata\\_shachova\\_73@mail.ru](mailto:nata_shachova_73@mail.ru)<sup>2</sup>, [anikonst@mail.ru](mailto:anikonst@mail.ru)<sup>3</sup>, [davi-helen@yandex.ru](mailto:davi-helen@yandex.ru)<sup>4</sup>

Received 17.11.2017 y.; received in final form 20.11.2017 y.

### Abstract

Offered approach to authentication of malfunctions of blocks of nuclear power installation nonpermanent and on the basis of discriminant analysis and neuron nets. The type of law of change of parameters of object of adjusting in malfunctions is certain. The analysis of different methods of authentication of the emergency states on the criterion of fast-acting at necessary exactness is conducted.

**Keywords:** neuron nets, classification with teaching, malfunction, nuclear power installation.

### Введение

В «Основах государственной политики в области ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» особое внимание уделяется разработке и внедрению инновационных методов, средств комплексного анализа, прогнозированию и оценке состояния ядерной и радиационной безопасности, научно-методической базе и программно-аппаратным средствам. Необходимость разра-

ботки аппаратно-программных комплексов АЭС с использованием новых моделей и методов определяется следующими факторами.

Во-первых, сложность технологических схем современных ядерных энергоустановок приводит к необходимости постоянного контроля более 20000 значений технологических параметров (для энергоблоков с реакторами ВВЭР-1000, РБМК-1000, РБМК-1500, БН-600), которые формируются их первичными датчиками. Несмотря на высокие эргономические харак-

теристики человеко-машинных интерфейсов, которые в последние годы стали широко применяться в компьютерном оснащении современных блочных щитах управления (БЩУ) АЭС, уровень информационной нагрузки операторов является высоким, близким к предельно допустимому [1].

Во-вторых, автоматические регуляторы, действующие на энергоблоке, помимо высокой надежности должны обладать высокой чувствительностью к изменениям входного сигнала. Для реализации выбранного закона регулирования и изменения параметров настройки регуляторов в необходимых пределах в его состав входят устройства формирования закона регулирования и изменения параметров настройки и задатчик ручного или автоматического управления. Наиболее распространенные исполнительные механизмы, входящие в состав регулятора, обладают характеристиками интегрального или пропорционального звена. Однако в аварийных режимах работы имеет место пропорционально-интегрально-дифференциальный закон изменения параметров объекта регулирования.

Несмотря на широкий спектр подходов к решению проблемы диагностики реакторных установок, представленный в [2-4], в последнее время возрос интерес к возможностям применения нейросетевых технологий [5] для идентификации и предупреждения отказов и аварий [1, 6].

Для идентификации типа аварии предлагается использовать параметрический дискриминантный анализ [7], дающего выигрыш во времени по сравнению с методом анализа «дерева вероятностей» [4]. В статье разработан метод, позволяющий повысить быстродействие и точность автоматических систем регулирования блоков ЯЭУ в результате программной реализации идентификации нештатных ситуаций на основе нейронных сетей.

### Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка подхода к идентификации нештатных и аварийных режимов блоков ЯЭУ на основе математического аппарата прикладной статистики и искусственного интеллекта для повышения быстродействия при обнаружении аномалий протекания технологического процесса. Для реализации поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) разработка подхода к идентификации типов аварий на основе статистического метода классификации с обучением;
- 2) создание метода идентификации нештатных

ситуаций для блоков ЯЭУ на основе нейронных сетей;

- 3) анализ различных методов идентификации состояния блоков ЯЭУ по критерию быстродействия при необходимой точности.

### Идентификации типа аварии на основе статистического метода классификации с обучением

Обычно в ЭВМ вводится несколько тысяч аналоговых и дискретных сигналов. Зная взаимосвязи между показаниями отдельных датчиков, можно с помощью ЭВМ распознавать предаварийные ситуации или анализировать уже возникшие. Самым простым методом анализа аварийных и предупредительных сигналов является фиксация момента появления аварийного или предупредительного сигнала и индикация этого сигнала на пульте оператора. Однако использование этого метода не уменьшает загруженности оператора.

Анализ аварийных и предупредительных сигналов методом оценки степени их важности заключается в группировании сигналов в соответствии со степенью их важности. Более важным присваивается индекс «1», менее важным — «0». Для выдачи оператору описания ситуации необходимо, чтобы сумма единиц превышала заранее назначенное значение. Основной трудностью реализации данного метода является сложность оценки степени важности отдельных сигналов. Наиболее предпочтительным является метод анализа ситуаций, возникающих при работе ядерного реактора, с использованием «деревьев» развития аварий. Проводится набор более вероятных связей появления одного сигнала с появлением соседнего сигнала в «дереве». Эти связи реализуются программным способом.

На рис. 1 приведен в виде «дерева событий» сценарий аварийной ситуации [4].

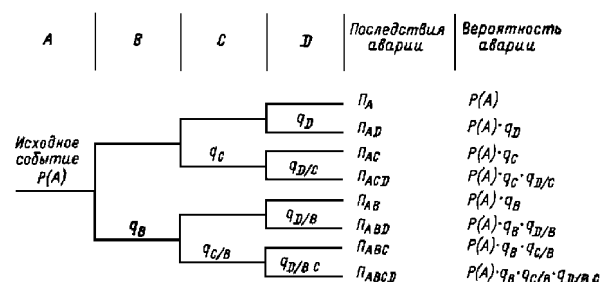


**Рис. 1.** Вид «дерева событий»: верхние ветви после разветвления соответствуют работоспособному состоянию системы, а нижние ветви — неработоспособному состоянию;  $q$  — вероятность отказа системы (B, C, D);  $P(A)$  — вероятность исходного события.

Листья «дерева событий» можно интерпретировать как классы, описываемые комбинациями сигналов, которые определяют обучающую выборку. При таком подходе решение задачи идентификации типа аварии возможно при помощи дискриминантного анализа.

В общем виде при классификации с обучением заранее известно число классов, к одному из которых с наибольшей точностью может быть отнесено наблюдение

$$X_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(p)}),$$

где  $x_i^{(1)}, x_i^{(2)}, \dots, x_i^{(p)}$  – анализируемые признаки (свойства).

Класс описывается распределением наблюдения  $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ . Выделяют два случая классификации с обучением:

- 1) распределения  $X$  полностью определены внутри классов (аналитически или с помощью перечисления всех возможных значений);
- 2) распределения  $X$  определены внутри классов частично (предположения о свойствах объекта или обучающая выборка).

Совокупность алгоритмов, порождающих на основании предположений и выборки конкретное правило классификации, называют дискриминантным анализом (ДА).

Задача ДА может быть сформулирована следующим образом.

Предположим, рассматривается две обучающие выборки, описывающие два класса систем. Первый класс содержит системы, удовлетворяющие требованиям по надежности в течение длительного периода времени, второй класс – системы, для которых ситуации отказов имеют место довольно часто. Каждая из выборок включает наблюдения двух параметров системы  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$ . Таким образом,  $i$ -я система описывается вектором параметров

$$X_i = (x_i^{(1)}, x_i^{(2)}).$$

Данные о  $n$  надежно функционирующих и  $n$  не надежно функционирующих системах по параметрам  $x^{(1)}$  и  $x^{(2)}$  приведены в форме таблицы.

**Таблица. Показатели функционирования систем**

| $i$      | Надежно функционирующие системы |                | Ненадежно функционирующие системы |                |
|----------|---------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|
|          | $x_{1i}^{(1)}$                  | $x_{1i}^{(2)}$ | $x_{2i}^{(1)}$                    | $x_{2i}^{(2)}$ |
| 1        | $x_{11}^{(1)}$                  | $x_{11}^{(2)}$ | $x_{21}^{(1)}$                    | $x_{21}^{(2)}$ |
| $\vdots$ | $\vdots$                        | $\vdots$       | $\vdots$                          | $\vdots$       |
| $n$      | $x_{1n}^{(1)}$                  | $x_{1n}^{(2)}$ | $x_{2n}^{(1)}$                    | $x_{2n}^{(2)}$ |

Необходимо знать, к какому классу относится система в настоящий момент, если известны текущие значения параметров  $x_0^{(1)}$  и  $x_0^{(2)}$  этой системы.

На практике при построении алгоритмов классификации обычно используют отношения правдоподобия. В зависимости от метода оценки параметров функций плотности распределения наблюдений  $f_1(X)$  и  $f_2(X)$  для первого и второго класса соответственно выделяют два метода построения алгоритмов классификации:

- 1) параметрический метод. Оценивается неизвестный вектор параметров  $\Theta$  предполагаемых теоретических распределений. Вместо вектора  $\Theta$  в функцию плотности распределения подставляется его оценка  $\hat{\Theta}$ . Вычисляется оценка функции  $\gamma(X)$  как

$$\hat{\gamma}(X) = \frac{f_2(X, \hat{\Theta}_2)}{f_1(X, \hat{\Theta}_1)};$$

- 2) непараметрический метод. Для наблюдения  $X$ , минуя оценку вектора параметров  $\Theta$ , строится оценка отношения  $f_2(X)/f_1(X)$ , т.е. общий вид функций плотности распределения не известен (например, используют гистограммы).

Рассмотрим параметрический дискриминантный анализ для случая классов с нормальным распределением. Предположим, что класс  $j$  идентифицируется  $p$ -мерной нормальной генеральной совокупностью с вектором средних значений  $\hat{a}_j$  и ковариационной матрицей  $\Sigma$  (общей для всех классов),  $j = \overline{1, k}$ . Тогда при реализации общих оптимальных правил классификации в качестве функций  $f_j(X)$  следует использовать  $p$ -мерные нормальные плотности  $\phi(X; \hat{a}_j, \hat{\Sigma})$ , где оценки для векторов средних значений  $\hat{a}_j = (\hat{a}_j^{(1)}, \hat{a}_j^{(2)}, \dots, \hat{a}_j^{(p)})$  и для ковариационной матрицы  $\hat{\Sigma} = (\hat{\sigma}_{lq})$  ( $l, q = \overline{1, p}$ ) получены по обучающим выборкам.

Расчет параметров распределений осуществляется по формулам

$$\hat{a}_j^{(l)} = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_{ji}^{(l)}, \quad l = \overline{1, p}, \quad j = \overline{1, k},$$

$$\hat{\sigma}_{lq} = \frac{1}{n_{\text{общ}} - k} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^{n_j} (x_{ji}^{(l)} - \hat{a}_j^{(l)})(x_{ji}^{(q)} - \hat{a}_j^{(q)}),$$

$$l, q = \overline{1, p}, \quad n_{\text{общ}} = \sum_{j=1}^k n_j.$$

В случае равных потерь от ошибочной классификации правило классификации принимает следующий вид

$$\frac{f_{j1}(X_0)}{f_{j2}(X_0)} \geq \frac{\pi_{j2}}{\pi_{j1}}, \quad j = \overline{1, k},$$

т.е. наблюдение  $X_0$  будет отнесено к  $j1$ -у классу, если неравенство выполняется, в противном случае – к  $j2$ -у классу.

Данное правило можно записать как

$$\ln \frac{f_{j1}(X_0)}{f_{j2}(X_0)} \geq \ln \frac{\pi_{j2}}{\pi_{j1}}, \quad j = \overline{1, k}.$$

В случае нормального распределения правило классификации в соответствии с моделью Фишера примет вид

$$[X_0 - (\hat{a}_{j1} + \hat{a}_{j2})/2]^T \hat{\Sigma}^{-1} (\hat{a}_{j1} - \hat{a}_{j2}) \geq \ln \frac{\pi_{j2}}{\pi_{j1}}.$$

Априори предполагают, что попадание вектора наблюдений  $X_0$  в любой класс равновероятно. Параметры распределения выборок рассчитываются до применения правила классификации для случайного вектора параметров  $X_0$ . Обновление значений выборочных параметров и определение параметров новых выборок производится по мере необходимости и не влияет на быстрдействие процесса идентификации.

Использование параметрического дискриминантного анализа при идентификации типа аварии решает проблему точности и раннего обнаружения в отличие от исследования по методу «дерева событий», которое является итерационным, поскольку предполагает выделение определяющих по последствиям аварийных цепочек и тщательный их повторный анализ. Однако при регулировании параметров блоков ЯЭУ рассматриваемая проблема точности и ранней идентификации нештатной ситуации наилучшим образом разрешается при использовании нейронных сетей.

### Метод идентификации нештатных ситуаций для блоков ЯЭУ на основе нейронных сетей

Для аварийных режимов изменение параметров описывается первой и второй производными, что требует для прогнозирования решения дифференциальных уравнений второго порядка при заданных текущих значениях параметра. Как аппаратная реализация на аналоговой технике, так и программная с использованием численных методов не обеспечивает необходимого быстрдействия, которое определяется не только

временем выполнения алгоритма, но и его возможностью раннего диагностирования начала нештатной ситуации. При рассмотрении в качестве законов регулирования пропорционального, интегрального или дифференциального не позволяет диагностировать на ранних стадиях появления нештатной ситуации.

Удовлетворение противоречивых требований к быстрдействию (сложностью) алгоритма регулирования и раннему обнаружению нештатной ситуации можно осуществить с помощью нейронных сетей, осуществляющих классификацию с обучением.

Первое систематическое изучение искусственных нейронных сетей было предпринято Маккалохом и Питтсом в 1943 г. Позднее они исследовали сетевые парадигмы для распознавания изображений, подвергаемых сдвигам и поворотам, используя при этом простую нейронную модель, показанную на рис. 2. Элемент  $\Sigma$  умножает каждый вход  $x_i$  на вес  $w_i$  и суммирует взвешенные входы. Если эта сумма больше заданного порогового значения, выход равен единице, в противном случае — нулю. Эти системы (и множество им подобных) получили название персептронов. Они состоят из одного слоя искусственных нейронов, соединенных с помощью весовых коэффициентов с множеством входов (рис. 3), хотя в принципе описываются и более сложные системы.

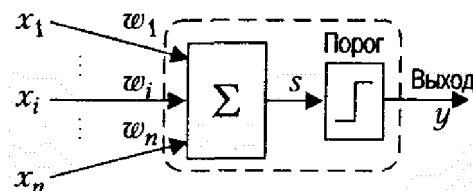


Рис. 2. Персептрон.

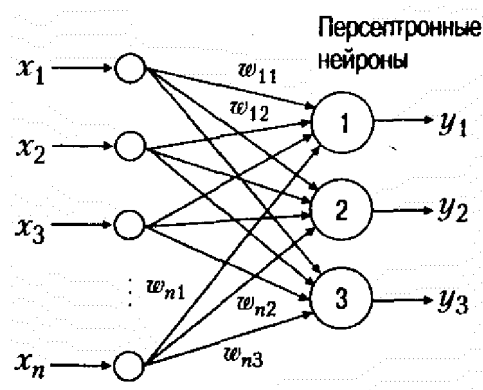


Рис. 3. Персептрон со многими выходами.

Рассмотрим в качестве примера персептрона с тремя нейронами (рис. 3), имеющих активаци-

онную функцию в виде единичного скачка.

На  $n$  входов поступают входные сигналы, проходящие по синапсам на три нейрона, образующие единственный слой этой сети и выдающие три выходных сигнала:

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n x_i w_{ij}\right), \quad j = 1, \dots, 3.$$

Очевидно, что все весовые коэффициенты синапсов одного слоя нейронов можно свести в матрицу  $W$ , в которой каждый элемент задает величину  $i$ -й синаптической связи  $j$ -го нейрона. Таким образом, процесс, происходящий в нейронной сети, может быть записан в матричной форме:

$$Y = f(XW)$$

где  $X$  и  $Y$  – соответственно, входной и выходной сигнальные векторы (здесь и далее под вектором понимается вектор-строка),

$f(S)$  – активационная функция, применяемая поэлементно к компонентам вектора  $S$ .

На рис. 4 представлен двухслойный персептрон, полученный из персептрона, изображенного на рис. 3, путем добавления второго слоя, состоящего из двух нейронов.

Фактически такая  $Q$ -слойная нейронная сеть эквивалентна сети с одним скрытым слоем и с весовой матрицей единственного слоя  $W_{(\Sigma)}$

$$Y = XW_{(\Sigma)}$$

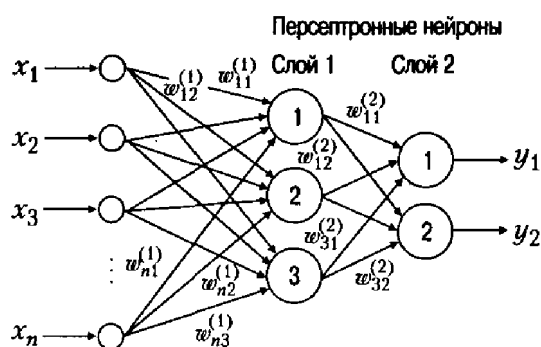


Рис. 4. Двухслойный персептрон

Работа персептрона сводится к классификации (обобщению) входных сигналов, принадлежащих  $n$ -мерному гиперпространству, по некоторому числу классов. С математической точки зрения это происходит путем разбиения гиперпространства гиперплоскостями. Для случая однослойного персептрона

$$\sum_{i=1}^n x_i w_{ij} = \theta_j, \quad j = 1, \dots, m.$$

Каждая полученная область является областью определения отдельного класса. Число та-

ких классов для персептрона не превышает  $2^n$ , где  $n$  – число его входов. Однако не все из классов могут быть выделены данной нейронной сетью.

Представим формализацию задачи классификации для персептрона.

Пусть есть некоторый объект, который характеризуется несколькими параметрами  $p_1, \dots, p_N$ . Пусть также есть  $M$  классов объектов,  $C_1, \dots, C_M$ . Вектор  $\mathbf{p}$  характеризует наблюдаемый объект:

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_1 \\ \vdots \\ p_N \end{pmatrix}$$

На основании вектора  $\mathbf{p}$  необходимо решить, к какому классу отнести объект, т.е. выбрать  $C_i$ , к которому принадлежит объект, характеризуемый набором параметров  $\mathbf{p}$ .

Решение задачи можно представить в виде вектора:

$$\mathbf{c} = \begin{pmatrix} c_1 \\ \vdots \\ c_M \end{pmatrix}$$

при выполнении условий

$$0 \leq c_m \leq 1 \quad \text{и} \quad \sum_{m=1}^M c_m = 1$$

где  $c_m$  – вероятность, с которой объект относится к классу  $C_m$ .

Если создать МСП с  $N$  входами и  $M$  выходами и обучить его давать на выходе вектор  $\mathbf{c}$ , когда на вход подается  $\mathbf{p}$ , то получим решение поставленной задачи.

Сеть строит отображение  $P \rightarrow C$  в процессе обучения. Целиком извлечь это отображение сеть не позволяет, но можно получить произвольное количество пар  $(\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{c})$ , связанных отображением. Для произвольного вектора  $\mathbf{p}$  на входе можем получить вероятности принадлежности к классам на выходе.

Такой способ формализации – не единственный, но один из удачных. Можно обучить сеть и по-другому. Пусть у сети только один выход, и пусть его смысл – номер класса  $m$  для вектора  $\mathbf{p}$ , предъявленного на входе. Следовательно, сеть обучается зависимости  $m(\mathbf{p})$ . Если обучение прошло успешно, то когда на вход сети подан вектор  $\mathbf{p}$ , характеризующий объект, на выходе будет получено число  $m$ , и нами принимается решение о принадлежности  $\mathbf{p}$  к классу  $C_m$ .

Предлагается для осуществления классификации состояния блока использовать персептрон с одним нейроном. Это позволит сократить до минимума время моделирования нейронной сети, не

снижая точности за счет учета скорости и ускорения изменения параметров. Если блок ЯЭУ описывается  $N$  параметрами, то количество анализируемых признаков составит  $3N$ , поскольку каждый параметр описывается своим значением, а также первой и второй производной.

Таким образом, в основе предлагаемого метода лежит классификация с обучением. Классификация осуществляется в один из двух классов, каждый из которых описывается обучающей выборкой. Предположим, что первый класс соответствует нормальному протеканию технологического процесса, а второй определяется отклонениями в работе управляемого блока. Таким образом, управляющий сигнал  $Y$  будет принимать значение из множества  $\{0; 1\}$ , где 0 – регулируемые параметры удовлетворяют требованиям, 1 – возникновение нештатной ситуации.

Этапы метода.

1. *Подготовка данных для обучения нейронной сети.* За период времени  $T_1$  работы блока в штатном режиме с шагом  $\Delta t$  по измерениям параметра  $X_i(t_j)$  ( $i = 1, N; j = 1, T_1 / \Delta t$ ) определяем

$$\frac{\Delta X_i(t_j)}{\Delta t} = \frac{X_i(t_j) - X_i(t_{j-1})}{\Delta t}, \quad (1)$$

$$\frac{\Delta^2 X_i(t_j)}{\Delta t^2} = \frac{X_i(t_j) - 2X_i(t_{j-1}) + X_i(t_{j-2}))}{\Delta t^2}. \quad (2)$$

Аналогично производим расчеты за период времени  $T_2$  работы блока в нештатном режиме.

2. *Обучение персептрона.* Подаем на  $3N$  входа персептрона вектора параметров для штатного и нештатного режимов, указывая соответственно значение выходного сигнала сети: 0 или 1.

Осуществляем инициализацию персептрона и организацию цикла адаптивной настройки персептрона.

3. *Моделирование нейронной сети.* На вход обученной сети подаем текущую комбинацию значений параметров и их производных, определенных в соответствии с формулами (1) и (2). Получаем на выходе сигнал  $Y$ , который подается на вход регулирующего механизма, определяя его действия.

4. *Повторное обучение.* Через время  $T_3$  осуществляет процесс обучения резервной сети ( $T_2 \ll T_3$ ). Заменяем рабочую нейронную сеть резервной. Моделирование рабочей сети идет параллельно обучению резервной.

Исходные входные векторы (с указанием их принадлежности к одному из двух классов) и результат настройки персептрона представлены на рис. 5.

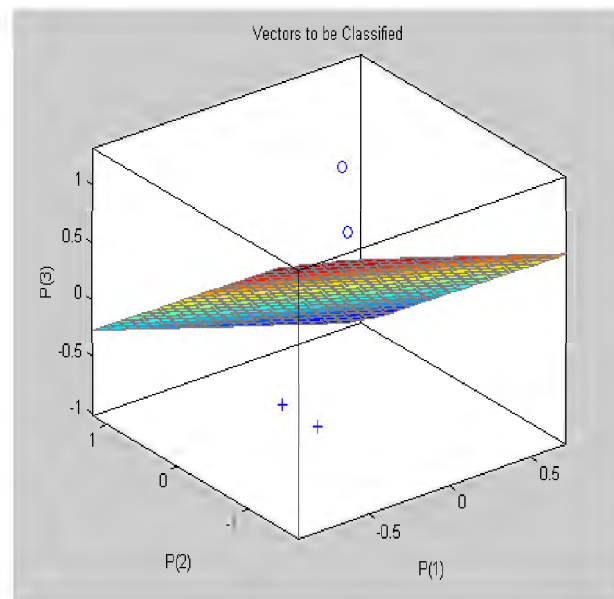


Рис. 5. Пример определения классов персептроном в трехмерном пространстве для одного параметра при четырех наблюдениях (исходные входные векторы и разделяющая плоскость).

### Сравнение сложности алгоритма идентификации различными методами

Сложность  $Q$  алгоритмов различных методов определяет их быстродействие и может зависеть от размера выборки  $l$ , числа параметров  $N$ , количества классов  $k$ , а для нейронных сетей количества нейронов  $m$ .

Так для метода анализа «дерева событий»  $Q$  определяется соотношением

$$Q \propto k(2^{N+1} - 1),$$

для дискриминантного анализа

$$Q \propto N^2 k, \quad (3)$$

для обученной нейронной сети

$$Q \propto Nkm \quad (4).$$

Таким образом, наиболее быстродействующим является метод на основе нейронных сетей, однако для таких сложных систем как ЯЭУ идентификация типа аварии, охватывающей несколько блоков и приводящих к разгерметизации контура, применение нейронной сети проблематично из-за ее большой размерности. Выражение (4) при  $m = 1$  отражает сложность сети в виде персептрона на одном нейроне, возможности которого ограничены сложностью решаемой задачи. Использование персептрона на одном нейроне для выработки управляющего воздействия для регулятора оправдано простотой программной реализации, определяющей высокое быстродействие при раннем обнаружении отклонений в технологическом процессе.

Использование дискриминантного анализа в случае большого количества, как классов аварий, так и рассматриваемых параметров даст более высокое быстроедействие, чем анализ «дерева событий» при идентификации аварии при  $N^2 \ll (2^{N+1}-1)$ . Кроме того, дискриминантный анализ эффективнее, чем нейронные сети в соответствии с (3) и (4), если  $N \ll m$ .

В некоторых работах предлагается для идентификации типа аварии использовать сеть встречного распространения. Эта сеть имеет два слоя с последовательными связями. Первый слой – слой Кохонена, второй – слой Гроссберга. Каждый элемент входного сигнала подается на все нейроны слоя Кохонена. Каждый нейрон слоя Кохонена соединен со всеми нейронами слоя Гроссберга.

Отличие сети встречного распространения от других многослойных сетей с последовательными связями состоит в операциях, выполняемых нейронами Кохонена и Гроссберга.

Сеть встречного распространения проста. Она дает возможность извлекать статистические свойства из множеств входных сигналов.

Кохоненом показано, что для полностью обученной сети вероятность того, что случайно выбранный входной вектор (в соответствии с функцией плотности вероятности входного множества) будет ближайшим к любому заданному весовому вектору, равна  $1/p$ ;  $p$  — число нейронов Кохонена.

При небольшом числе нейронов результат моделирования при случайной комбинации сигналов на входах сети может не соответствовать реальности.

## Заключение

Предложен подход к идентификации нештатных и аварийных режимов блоков ЯЭУ на основе дискриминантного анализа и нейронных сетей.

Определен вид закона изменения параметров объекта регулирования в аварийных режимах, который описывается первой и второй производными, что требует для прогнозирования решения дифференциальных уравнений второго порядка при заданных текущих значениях параметра.

Предложен метод, позволяющий разрешить противоречия требований к быстроедействию (сложности) алгоритма регулирования и раннему обнаружению нештатной ситуации, который основывается на использовании нейронных сетей, выполняющих классификацию с обучением.

Проведен анализ различных методов идентификации состояния блоков ЯЭУ по критерию быстроедействия при необходимой точности. Использование дискриминантного анализа в случае большого количества, как классов аварий, так и рассматриваемых параметров имеет преимущество перед анализом «дерева событий».

Показано, что для случая, когда количество параметров значительно меньше размерности нейронной сети встречного распространения, целесообразно применение дискриминантного анализа.

Применение персептрона на одном нейроне для выработки управляющего воздействия для регулятора оправдано простотой программной реализации и высоким быстроедействием.

Предложенный подход к идентификации аварийных режимов блоков ЯЭУ направлен на модификацию программной части существующих регуляторов и позволяет сократить время принятия решения при возникновении нарушений технологического процесса.

## Список литературы

1. Шаповалова С.И., Шараевский Г.И. Среда моделирования нейронных сетей для решения задач диагностики оборудования АЭС // Проблемы программирования – 2008. – № 2-3. – С. 675-678.
2. Григорьев В.А., Колубин А.А., Логинов В.А. Электронные методы ядерно-физического эксперимента. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 336 с.
3. Анохин А.Н., Острейковский В.А., Сальников Н.Л. Системы поддержки оператора АЭС. – Обнинск: Институт атомной энергетики, 1988. – 92 с.
4. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынин Г.Б. Безопасность ядерных энергетических установок. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 279 с.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
6. Лескин С.Т., Слободчук В.И., Шелегов А.С. Анализ состояния ГЦН ВВЭР1000 в процессе эксплуатации. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – №4. – С. 12-20.
7. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика и основы эконометрии. – М.: ЮНИТИ, 1998. – 1022с.

## References

1. Shapovalova S.I., Sharoevskij G.I. Environment of design of neuron nets for the decision of tasks of diagnostics of equipment of APP. *Problemy hrogrammirovaniya*, 2008, № 2-3, pp. 675-678.
2. Grigor'ev V.A., Kolyubin A.A., Loginov V.A. *Elektronnye metody yaderno-fizicheskogo eksperimenta* [Electronic methods of nuclear-physical experi-

- ment]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 336 p.
3. Anohin A.N., Ostrejkovskij V.A., Sal'nikov N.L. *Sistema podderzhki operatora AES* [Systems of support of operator of APP ]. Obninsk, Institut atomnoj anergitiki, 1988, 92 p.
  4. Bahmet'ev A.M., Samojlov O.B., Usynin G.B. *Bezopasnost' yadernyh energeticheskikh ustanovok* [Safety of nuclear power installations]. Moscow, Energoatomizdat, 1989, 279 p.
  5. Hajkin S. *Nejronnye seti: polnyj kurs* [Neuron nets: complete course]. Moscow, Izdatel'skij dom «Vil'yams», 2006, 1104 p.
  6. Leskin S.T., Slobodchuk V.I., Shelegov A.S. Analysis of the state PCP PWR1000 in the process of exploitation *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*, 2016, №4, pp. 12-20.
  7. Ajvazayn S.A., Mhitaryan V.S. *Prikladnaya statistika i osnovy ekonometrii* [Applied statistics and bases of mathematical economics ]. Moscow, YuNITI, 1998, 1022 p.

---

---

## ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 62-50(07)

### Тенденции, состояние, возможности, перспективы развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в Республике Крым и г. Севастополь.

В.А. Сафонов<sup>1</sup>, А.А. Восканян<sup>2</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,  
г. Севастополь, 299053, Россия. <sup>1</sup>hydrogen@hotmail.ru, <sup>2</sup>artur\_voskanyan\_77@mail.ru

Статья поступила 02.12.2017 г.; после доработки 07.12.2017 г.

---

#### Аннотация

В статье представлен комплекс предложений по развитию возобновляемых источников электроэнергии в целях повышения энергообеспеченности и снижения энергодефицитности региональной экономики в Республике Крым и г. Севастополь. Обосновано приоритетное использование альтернативных источников электроэнергии: солнечной радиации и энергии ветра, а так же потенциала автономной возобновляемой энергетики для целей снижения энергодефицитности региона.

*Ключевые слова:* энергодефицитность, возобновляемые источники энергии, автономная возобновляемая энергетика, государственная региональная политика, территория опережающего экономического развития.

---

### Trends, status, opportunities, perspectives of development in obnovlen-nyh energy sources (V) in the Republic of Crimea and Sevastopol.

V. A. Safonov<sup>1</sup>, A. A. Voskanyan<sup>2</sup>

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
<sup>1</sup>hydrogen@hotmail.ru, <sup>2</sup>artur\_voskanyan\_77@mail.ru

Received 02.12.2017 y.; received in final form 07.12.2017 y.

---

#### Abstract

The paper presents a set of proposals for the development of renewable energy sources to improve energy availability and reduce energodefitsiten regional economy in the Republic of Crimea and Sevastopol. It justifies preemptive use of alternative energy sources: solar radiation and wind energy, as well as the potential of Autonomous renewable energy for the purposes of reducing energodefitsiten region.

*Keywords:* energy shortage, renewable energy, autonomous renewable energy, state regional policy, the area of advanced economic growth.

---

#### Введение

Ресурсы ископаемых видов топлива расходуются высокими темпами. Уже в этом столетии их дефицит может существенно сказаться

на жизни людей, в связи с чем в качестве альтернативы особое внимание уже сейчас уделяется возобновляемым источникам энергии (ВИЭ). Основными преимуществами возобнов-

ляемых источников являются неисчерпаемость и экологическая чистота эксплуатации большинства установок на их основе. Именно эти свойства определяют перспективность данного направления.

### **Цель исследования**

Целью данного исследования является обзор региональных аспектов развития и использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ). В рамках темы исследования представляется интересным анализ проблем и перспектив инвестирования регионального развития энергетики Крыма как региона с относительно большим инвестиционным потенциалом.

### **Использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии**

В настоящее время во всем мире наблюдается повышенный интерес к использованию в различных отраслях экономики нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ). Ведется бурная дискуссия о выборе путей развития энергетики. Это связано, прежде всего, с растущей необходимостью охраны окружающей среды.

Движущей силой этого процесса являются происходящие изменения в энергетической политике стран со структурной перестройкой топливно-энергетического комплекса, связанной с экологической ситуацией, складывающейся в настоящее время как переходом на энергосберегающие и ресурсосберегающие технологии в энергетике, так и в промышленности и в жилищно-гражданском комплексе.

Ежегодно в мире увеличивается число международных симпозиумов, конференций и встреч ученых и специалистов, рассматривающих состояние и перспективы развития этого направления энергетики. Значительное внимание этой проблеме уделяется организациями, входящими в ООН, такими как ЮНЕСКО, ЕЭК, ЮНЕП, ЮНИДС, а также другими межправительственными и неправительственными международными организациями. Выделяются значительные средства на работы в области НВИЭ из целевых ассигнований ЕЭС, Европейского фонда национального развития, Евроатома и других организаций.

Приближающаяся угроза топливного "голода", а также загрязнение окружающей среды и тот факт, что прирост потребности в энергии значительно опережает прирост ее производства, вынуждает многие страны с новых пози-

ций обратить внимание на энергию солнечных лучей, ветра, текущей воды, тепла земных недр, то есть на энергию, большая часть которой растворяется в пространстве, не принося ни вреда, ни пользы.

В настоящее время на производство тепла и электричества расходуется ежегодно количество тепла, эквивалентное примерно 1000 трлн. баррелей нефти, сжигание которых сильно засоряет атмосферу Земли.

**Опыт.** В 1990 г. первое место по объему бюджетных ассигнований на НИОКР в области НВИЭ сохранялось за США, второе – у Японии, у Германии – третье, далее следуют Италия, Испания, Великобритания и Нидерланды. Отмечается также некоторая смена приоритетов в отношении к различным видам НВИЭ.

Первое место принадлежит теперь солнечной энергетике, второе – биоэнергетике, которая несколько оттеснила ветроэнергетику. Последнее объясняется тем, что многие ветроэнергетические проекты не доведены до промышленной и коммерческой стадии.

Третье место осталось за геотермальной энергетикой. В «Белой книге» ООН (1992 г.), посвященной роли НВИЭ приведена оценка удельных затрат на строительство энергетических установок на нетрадиционных возобновляемых источниках энергии.

Внедряемые перспективные технологии традиционной энергетики повышают эффективность использования энергоносителей, но не улучшают экологическую ситуацию, что необходимо для курортно-оздоровительных зон Крыма.

В связи с этим возникает необходимость выявления возможностей рационального использования топливно-энергетических ресурсов традиционной энергетики, с одной стороны, и разработки и широкого внедрения в Крыму научно-технических разработок и предложений по использованию нетрадиционных и возобновляемых экологически чистых источников энергии (НВИЭ), - с другой стороны. [5].

К возобновляемым источникам, которые в данное время могут быть эффективно использованы в энергетическом хозяйстве Крыма, относятся: энергия солнца, энергия ветра, энергия биомассы, энергия малых рек и водосбросов, геотермальная энергия, тепловая энергия подземного грунта и поверхностных вод.

Кроме того, по оценкам специалистов, при сохранении существующих способах добычи нефти и природного газа и их потреблении на уровне 80-х гг., извлекаемые запасы природных ресурсов в Крыму могут быть исчерпаны уже

через 40-50 лет.

Для решения этих проблем необходимы, прежде всего, переоценка приоритетов и принятие нетрадиционных и эффективных мер по перестройке топливно-энергетического хозяйства Крыма в направлении более экономного использования его главного достояния - топливно-энергетических ресурсов.

Энергетическая политика должна соответствовать современным требованиям: быть социально значимой и сориентироваться на повышение жизненного уровня населения. Снижение энергоёмкости отечественной продукции является важнейшим условием обеспечения энергетической безопасности Крымского региона в частности.

Первоочередными объектами, к которым должна применяться энергосберегающая политика, являются энергоёмкие промышленные предприятия и организации ведущих отраслей экономики Крыма. При этом особое внимание должно быть уделено мероприятиям, позволяющим при небольших затратах достичь быстрого возврата вложенных средств за счет более эффективного использования энергоносителей.

Основная часть технологических разработок должна быть направлена на модернизацию и оптимизацию технологических процессов с целью уменьшения энергетических затрат на единицу выпускаемой продукции, снижения потерь тепловой и электрической энергии и экономии органического топлива на теплоисточниках.

Как известно, развитие основных отраслей экономики Крыма полностью зависит от надежности энергообеспечения внутренних потребителей и стоимости энергоносителей. Периодическое увеличение затрат на приобретение ТЭР при переходе к рыночным отношениям ставит в очень тяжелое экономическое положение как отдельные энергоёмкие промышленные предприятия, так и основные отрасли экономики Крыма в целом. На каждого жителя республики приходится около 3 тыс. кВт.час электроэнергии в год. Для сравнения: в бывшем СССР в среднем 6 тыс., в США — 11 тыс., в Норвегии — 15 тыс. кВт час в год на человека.

### **Поиск новой стратегии: Проблемы, потенциал, перспективы развития Крыма при использовании возобновляемых источников энергии.**

Энергетический комплекс Республики Крым в настоящее время можно отнести к региональным производителям энергии с низким инвестиционным потенциалом.

Необходимость реконструкции производ-

ственного потенциала и поддержания объемов производства на уровне, обеспечивающем потребности Республики Крым, требуют значительной инвестиционной активности в энергетическом комплексе [2].

Продолжение современных неблагоприятных тенденций инвестирования энергетического комплекса приведет к неустойчивой динамике производства энергии в регионе в будущем.

Для повышения деловой активности в энергетическом комплексе Республики Крым необходимы капиталовложения, которые дадут возможность стимулировать внедрение региональных научно-технических, инвестиционных и инновационных программ в области энергосбережения и альтернативной энергетики.

Эксперты мирового уровня небезосновательно утверждают, что с помощью возобновляемых источников энергии (ветра, солнца, воды) можно бороться с ростом цен на традиционные энергоносители, такие как нефть и газ.

Анализ потенциала возобновляемых источников энергии крымского региона свидетельствуют о возможностях и целесообразности более широкого их использования на местах с целью экономии тепла и топлива на существующих традиционных источниках тепла.

Экономически целесообразный достижимый потенциал остальных ВИЭ в Крыму оценивается, тыс. МВт•час/год:

- солнечная энергия – 270;
- мелко-масштабные источники гидроэнергии – 63;
- биомасса – 734,14;
- геотермальная энергия – 207,36;
- излишек биогаза – 29;
- низкопотенциальная тепловая энергии сточных вод – 477;
- низкопотенциальная тепловая энергии грунтов и грунтовых вод – 206.

Всего данные источники энергии потенциально могут обеспечивать  $1986,5 \cdot 10^3$  МВт•час/год – 1986,5 ГВт•час/год  $\approx 2$  ТВт•час/год.

Из всех видов возобновляемых нетрадиционных экологически чистых источников энергии наибольшим энергетическим потенциалом в Крыму обладает солнечная радиация. Годовое поступление солнечного излучения составляет 5223 Дж/м<sup>2</sup>.

Этот показатель сходен с соответствующими показателями для таких стран как Германия, Австрия, Италия, США, где имеются целые программы по солнечному теплоснабжению и широкому внедрению гелиоустановок для приготовления горячей воды и отопления зданий.

Под гелиотехническими возможностями территорий подразумевается не только количественная характеристика потоков лучистой энергии, но и качественная, т.е. возможность их использования для работы гелиотехнических установок в течение года с наибольшей энергетической эффективностью.

Средняя продолжительность солнечного сияния по месяцам для города Симферополя в часах представлена в таблице 1.

**Таблица 1.** Средняя продолжительность солнечного сияния по месяцам для города Симферополя.

| Месяц    | Время, ч. |
|----------|-----------|
| Январь   | 84        |
| Февраль  | 95        |
| Март     | 158       |
| Апрель   | 200       |
| Май      | 271       |
| Июнь     | 287       |
| Июль     | 327       |
| Август   | 308       |
| Сентябрь | 240       |
| Октябрь  | 178       |
| Ноябрь   | 115       |
| Декабрь  | 78        |
| За год   | 2343      |

**Таблица 2.** Потенциал возобновляемых источников энергии в Крыму.

| Источники энергии                       | Расчетный потенциал | Использование в 1996 году | Технический потенциал | Рекомендуемое использование |
|-----------------------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| Геотермальная энергия                   | $710 \cdot 10^9$    | $16,1 \cdot 10^3$         | $2156 \cdot 10^6$     | $426 \cdot 10^6$            |
| Ветровая энергия                        | $96 \cdot 10^9$     | $8,8 \cdot 10^3$          | $35,8 \cdot 10^6$     | $0,5-0,8 \cdot 10^6$        |
| Солнечная энергия                       | $32,2 \cdot 10^9$   | $22,5 \cdot 10^3$         | $5,8 \cdot 10^6$      | $1,3-1,8 \cdot 10^6$        |
| Биомасса и сельскохозяйстве иные отходы | $0,56 \cdot 10^6$   |                           | $0,27 \cdot 10^6$     | $0,2 \cdot 10^6$            |
| Гидроэнергия                            | $0,2 \cdot 10^6$    | -                         | $0,08 \cdot 10^6$     | $0,08 \cdot 10^6$           |
| Всего                                   |                     | $47,4 \cdot 10^3$         | $2198 \cdot 10^6$     | $428 \cdot 10^6$            |

Однако сейчас имеются технологические и экономические ограничения их широкого использования. Например, у солнечной и ветровой энергии низкая пространственная плотность и неустойчивость во времени. Даже если построить очень много ветровых и солнечных электрических станций, которые в сумме смогут давать достаточно энергии, энергетическая система будет неустойчива из-за больших колебаний во времени потоков энергии. На сегодняшний день современные технологические возможности позволяют покрыть за счет возобновимых источников до 10% требуемой энергии. Но технологии непрерывно совершенствуются, что дает уверенность в достижении более высокого уровня использования возобновляемой

Из приведенных данных видно, что использование солнечной энергии в Крыму предпочтительнее в летний (неотопительный) период с апреля по октябрь, когда продолжительность солнечного сияния является наибольшей.

Суммарные потенциальные ресурсы возобновляемых нетрадиционных источников энергии в Крыму достаточны, чтобы обеспечить в ближайшей перспективе значительную часть потребности в топливно-энергетических ресурсах Автономной Республики Крым.

Потенциал возобновляемых источников энергии в Крыму.

Несмотря на отсутствие финансирования, имеет место тенденция к устойчивому росту использования энергопотенциала ВИЭ.

Крымский регион обладает наибольшими среди регионов России величинами возобновимых источников энергии: солнечной, ветровой, геотермальной, энергии биомассы. Их расчетный потенциал значительно превышает потребности Крыма в энергии. [7].

Потенциал возобновляемых источников энергии в Крыму приведен в таблице 2.

энергии в ближайшие годы.

Разрабатываемые и принимаемые в последние годы программы и проекты развития Крымского региона нацелены на уменьшение зависимости от поставок энергии извне, поэтапного, постепенного, и неукоснительного увеличения доли возобновляемой энергетики.

Крым располагает значительными природными ресурсами возобновляемой энергетики.

Солнце, ветер, биомасса, геотермальное тепло. Пространственный анализ изменения прямой и суммарной солнечной радиации, повторяемости часовых сумм солнечной радиации, продолжительности солнечного сияния в основных рекреационных районах Крыма (Южное побережье, Сакско-Евпаторийский, Керченский

и Тарханкутский районы) показали, что они обладают значительными ресурсами для развития гелиоэнергетики.

Являясь южным и тёплым регионом России, Крым ещё длительный период будет использоваться как основной рекреационный район страны и многих стран СНГ для массового оздоровления и лечения. Основная функция, которую выполняют курорты - восстановление здоровья. Это намного важнее, чем получение экономической прибыли от элитных клиентов и иностранных туристов, если рассматривать задачу не с позиций сиюминутного пополнения бюджета, а с государственных позиций, с точки зрения перспектив развития нашего общества. Эффективность реализации главных рекреационных функций полуострова (оздоровление, лечение) базируется в основном на использовании природных факторов, связанных с экологическим состоянием окружающей среды. Это обязывает развивать в рекреационных районах Крыма экологически приемлемую энергетику, не использовать те виды энергетики, которые могут увеличить загрязнение. Ожидаемое быстрое развитие рекреационной отрасли приведет к росту энергопотребления. Неизбежно возрастет антропогенная нагрузка на территорию рекреационных районов и ухудшение в них экологической ситуации. Поэтому перестройку рекреационной отрасли и развитие рекреационных районов Крыма необходимо осуществлять одновременно с их экологизацией.

По современным оценкам специалистов, в Крыму потенциал нетрадиционной энергетики (ветровой, солнечной, геотермальной, волновой и био) может обеспечить получение электроэнергии в количестве, превышающем современные потребности в 4-5 раз.

### Возобновляемые источники энергии Крыма.

По современным оценкам специалистов, в Крыму потенциал нетрадиционной энергетики (ветровой, солнечной, геотермальной, волновой и био) может обеспечить получение электроэнергии в количестве, превышающем современные потребности в 4-5 раз.

За девять месяцев 2013 г. с помощью ВИЭ было получено 285,7 млн. кВт. ч, что составляет 30% от общего объёма производства энергии на полуострове (ещё в 2011 г. этот показатель находился на отметке в 7%) [3].

За январь-сентябрь 2014 г. солнечные электростанции дали 251,2 млн. кВт. ч и ветровые 34,6 млн. кВт.ч, покрыв вместе 6,6% общего объёма энергопотребления Крыма. Карта размещения ВИЭ на полуострове и план обеспечения Крыма электроэнергией приведена на рис. 1.



Рис.1 Карта размещения ВИЭ на полуострове и план обеспечения Крыма электроэнергией.

В начале ноября 2014 г. общая установленная мощность объектов "зелёной" энергетики в Крыму зафиксирована на уровне 295,5 МВт, в том числе:

- солнечные электростанции – 227,3 МВт;
- ветровые – 68,2 МВт.

Строительство альтернативных электро-

станций требует серьёзных инвестиций. Для создания дополнительной мощности в 1 тыс. МВт необходимо закольцевать весь Крым высоковольтными сетями, построить новые подстанции, а это - миллиардные инвестиционные программы. Годовой технически достижимый потенциал энергии ВИЭ ФО Крым составляет

31,84 млрд. кВт.ч/год (6,61 млн. т у.т./год) и распределяется следующим образом:

- ветроэнергетика - 6,95 млрд. кВт. ч/год (3,5 млн. т у.т./год),
- геотермальная энергетика – 9,72 (1,11),
- солнечная энергетика - 1,82 (0,38),
- биоэнергетика – 5,21 (0,64);
- малая гидроэнергетика – 0,14 (0,05),

– энергетика окружающей среды (тепловые насосы) - 800 млрд. кВт.ч/год (0,93 млн т у.т./год).

На рис. 2 можно увидеть тип ВИЭ и мощность генерации[6].



Рис. 2. Мощность генерирующих объектов.

### Солнечная энергетика.

Общая выработка электроэнергии на солнечных электростанциях Крыма составила в 2012 г. 303 млн. кВт.ч (38% от общей выработки энергии и 5% от общего её потребления). Потенциал солнечной энергетики на полуострове,

по усреднённым оценкам, приближается к 1400 кВт.ч/м<sup>2</sup>, что соответствует уровню таких стран, как США, Германия, Швеция, и позволяет экономить ежегодно около 2,5 млн т у.т., используя солнечные батареи и тепловые солнечные коллекторы. В Крыму должна быть реализована программа строительства солнечных

электростанций общей мощностью 1000 МВт и ветровых электростанций такой же суммарной мощности. [1].

В настоящее время мощность солнечных парков на полуострове составляет 227,3 МВт.

В 2011 г. завершено строительство 7,5-мегаваттной электростанции "Родниковое", 80-мегаваттного парка "Охотниково" и 100-мегаваттного парка "Перово".

Увеличена установленная мощность СЭС

"Перово" до 105,56 МВт и "Охотниково" до 82,65 МВт, а также завершено строительство парка "Митяево" мощностью 31,55 МВт. Строительство солнечных электростанций в Крыму позволило создать свыше 800 новых рабочих мест, преимущественно для местного населения, и ещё более 100 для высококвалифицированных инженеров (рис.3).



Рис. 3. Этапы строительства энергомоста в Крым.

### Ветроэнергетические ресурсы Крыма.

Ветроэнергетика на территории полуострова представлена четырьмя государственными предприятиями, осуществляющими опытно-промышленную эксплуатацию 7 ветроэлектростанций (далее - ВЭС), на которых установлен 5551 ветроагрегат мощностью 68,2 МВт. 6

Ресурсы ветровой энергии, которыми располагает Крым, сосредоточены главным образом в прибрежных зонах Чёрного и Азовского морей, а также в горной части полуострова. На полуострове построено десять ветроэлектростанций.

В 1994 г. на берегу озера Донузлав начала действовать первая очередь Донузлавской ВЭС

с установленной мощностью 5,7 МВт. Смонтировано 53 ветроагрегата типа USW-56-100 мощностью 107 кВт. ч. каждый. Планируется также строительство новых высокоэффективных ветропарков.

В настоящее время на полуострове четыре госпредприятия ветроэнергетики эксплуатируют семь ВЭС с 544 ветроагрегатами:

- Донузлавская ВЭС (суммарная мощность 18,7 МВт);
- "Водэнергоремналадка" (26 МВт);
- Тарханкутская ВЭС (15,9 МВт);
- Восточно Крымская ВЭС.

С начала эксплуатации они выработали более 300 млн кВт • ч электроэнергии. Кроме того,

по информации Минтопэнерго Крыма, существуют 16 инвестиционных проектов строительства ВЭС с использованием ветроустановок мощностью 2 - 3 МВт. Если эти проекты будут реализованы, на полуострове будет генерироваться более 5000 тыс. МВт электрической мощности. Теоретически заявленная мощность способна обеспечить электроэнергией практически весь Крым.

### **Энергетика Крымского федерального округа**

Тем не менее эксперты говорят, что время для инноваций в энергетике Крыма еще не пришло. Сначала энергосистема полуострова должна получить запас прочности.

Напомним, в начале мая подключена последняя, четвертая, нитка энергомоста "Кубань-Крым". Благодаря перетоку с материка, полуостров получает 800 МВт электроэнергии ежедневно. Столько же республика получала с территории Украины до декабрьского блэкаута. Кроме того, в районе Симферополя и Севастополя сейчас строят две теплоэлектростанции.

Первые энергоблоки мощностью 235 МВт каждый должны быть введены в строй уже в 2017 году. В дальнейшем мощность каждой станции составит 470 МВт.

Есть два параллельных процесса. Один обеспечивает энергетике надежность и безопасность работы. Это строительство новых мощностей и реконструкция существующих. Второй процесс - это внедрение инноваций.

Чтобы уменьшить риск, эти два процесса пока не совмещены.

После реализации первого пилотного проекта можно будет ставить вопрос о более широком внедрении инноваций. Вопрос о совмещении этих двух процессов мы планируем рассмотреть в течение ближайших 1,5 - 2 лет.

Увы, распределительные сети республики катастрофически изношены, а генерирующие мощности нуждаются в модернизации. Но у полуострова есть и свой очевидный козырь: сейчас свыше половины собственной генерации Крыма приходится на возобновляемую энергетику. Суммарная мощность солнечных станций в Крыму составляет 297 МВт, а с вводом в строй еще одной новой станции на 110 МВт в 2016 году она увеличится до 407 МВт.

Вместе с ветровой энергетикой, генерирующей сегодня 83 МВт, совокупная мощность возобновляемых источников энергии в Крыму составляет почти 500 МВт. Однако ахилесовой пятой солнечной энергетики является ее зави-

симость от времени суток и погоды.

Решить эти проблемы могут инновации, использование которых эксперты прогнозируют в ближайшие 10 - 20 лет [5].

### **Мегаватты до востребования**

Российская экономика вступила в фазу постиндустриального развития, что для энергетической отрасли в первую очередь означает постепенный уход от чрезмерного монополизма и централизации. Это означает, что вырабатывать и продавать электроэнергию будут не только крупные энергокомпании, но и сами потребители, индивидуально или объединившись в кооперативы.

Уход потребителей от централизованной генерации - это тенденция, клиент сам становится заказчиком в энергетике.

Возобновляемые источники энергии и распределенная генерация станут более доступными для пользователей благодаря удешевлению технологий и новым технологиям хранения электроэнергии.

Сегодня солнечные электростанции заметно проигрывают традиционным из-за перепадов генерации в темное время суток или во время облачности. Но все изменится, когда выработанную днем энергию можно будет надежно и недорого хранить, чтобы продавать круглосуточно.

Главный вопрос мировой энергетики: когда появятся дешевые устройства накопления энергии. Это направление активно финансируют все мировые компании, державы, в том числе Россия. Когда они появятся, в энергетике произойдут изменения.

Возникнет совершенно другой бизнес: накопление электроэнергии и продажа ее при пиковых нагрузках сетей. Это конкурентоспособный бизнес, требующий интеллектуального подхода, потому что связан с информационным обменом между продавцом и потребителем [4].

Уже через 15 - 20 лет хранилища электроэнергии станут такой же повседневной реальностью, как сегодня продуктовые хабы.

Энергетика перестанет существовать в чистом виде, и ее технологии вызовут большой интерес IT-индустрии, мобильных телекоммуникационных компаний, автомобильных концернов, вкладывающих гигантские деньги в поиск и разработку новых средств накопления энергии.

За последние пять-шесть лет себестоимость одного киловатта-часа в возобновляемой энергетике снизилась на 50 - 70 процентов. А в об-

ласти хранения энергии разработки идут еще более высокими темпами.

В накоплении энергии сейчас фаза ожидания того момента, когда стоимость оборудования для хранения киловатт-часа опустится до 150 - 200 долларов.

Это порог, после которого начнется активное развитие коммерческого рынка накопленной энергии. Сейчас в мире этот показатель равен 350 - 400 долларам. Россия в этом смысле не отстает от основных конкурентов на мировом рынке.

В "Сколково" сейчас около 15 участников, разрабатывающих новые технологии в области электрохимии, сейчас трудятся над эффективными способами накопления энергии. В том числе несколько резидентов технопарка разрабатывают сетевые накопители, имеющие другие характеристики, нежели автомобильные: для сетевых аккумуляторов ключевым параметром будет стоимость одного цикла заряда, а для автомобильных большое значение имеет вес устройства.

### Заключение

Законодательство должно предоставлять реальные рычаги для развития устойчивой зеленой энергетики. В этом вопросе условия локализации отечественных комплектующих ВИЭ безусловно важны. Но объем локализации должен соответствовать реальным возможностям и интересам российского производителя.

Одним из эффективных способов продвижения ВИЭ в России может стать смягчение законодательных требований в этом направлении и поддержка методов стимулирования отечественных технологий на законодательном уровне.

В апреле 2015 г. при правительственной комиссии по электроэнергетике создана рабочая группа по развитию ВИЭ с участием представителей Минэкономразвития, Минпромторга, Минэнерго, генерирующих компаний, возможных девелоперов и производителей оборудования, а также представителя потребителей.

Обсуждаются возможные изменения программы поддержки инвесторов в зеленую энергетику, в том числе пересмотр условий по капитальным затратам для проектов ВИЭ, снижение требований по локализации для 7 ветроэнергетики, а также энергоблоков, работающих на основе свалочного и биогаза и биомассы.

Это многообещающий шаг, но кроме этого нужно пересматривать приоритеты энергетической политики.

В целом, нужно выделять средства на научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.

Нужно уменьшать субсидии традиционной углеводородной энергетике и перенаправлять их на развитие зеленой энергетики, уменьшать требования по резервированию мощностей по зеленую генерацию.

### Список литературы

1. Об эффективности и других ценностях солнечной энергетики. Слепокуров А.С. // Крым, стройиндустрия, энергосбережение. №1(2), февраль 2009.
2. Научная статья по теме: РАЗВИТИЕ ВИЭ КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВА, 2015 г.
3. Источник: <http://naukarus.com/razvitie-vie-krymskogo-poluostrova>
4. Министерство топлива и энергетики Республики Крым – отчет за 2014 год «Информация о развитии и текущей ситуации в топливно-энергетическом комплексе Республики Крым за 2014 год». [Электронный ресурс]. URL: [http://mtop.rk.gov.ru/file/Informacija\\_o\\_razvitii\\_i\\_tekushhej\\_situacii\\_v\\_toplivno\\_jenergeticheskom\\_komplekse\\_RK\\_2014.pdf](http://mtop.rk.gov.ru/file/Informacija_o_razvitii_i_tekushhej_situacii_v_toplivno_jenergeticheskom_komplekse_RK_2014.pdf)
5. Современная рыночная электроэнергетика Российской Федерации. – М.: АНО «Учебный центр НП «Совет рынка», 2012.
7. Тенденции развития возобновляемых источников энергии в России и мире / Шкрадюк И.Э. - М.: WWF России, 2010.
8. Электроэнергетическая система Республики Крым. Министерство топлива и энергетики Республики Крым, 2016. [http://old.invest-in-crimea.ru/show\\_content.php?alias=passport\\_energy&mid=1&m2=465](http://old.invest-in-crimea.ru/show_content.php?alias=passport_energy&mid=1&m2=465)
9. Елистратов, В.В. Климатические факторы возобновляемых источников энергии [Электронный ресурс]: / В.В. Елистратов, Е.М. Актентьева, М.М. Борисенко: (Санкт Петербургский государственный политехнический университет), 2010.

### References

1. Efficiency and other values of solar energy. A. S. Slepokurov // Crimea, construction industry, energy-saving.No.1(2),February2009.
2. Scientific article on the topic: DEVELOPMENT of renewable energy sources of the CRIMEAN PENINSULA , in 2015 Source: <http://naukarus.com/razvitie-vie-krymskogo-poluostrova>
3. The Ministry of fuel and energy of the Republic of Crimea – report 2014 "Information about the development and current situation in the fuel and energy complex of the Republic of Crimea for 2014". [Electronic Resurs].URL:[http://mtop.rk.gov.ru/file/Informacija\\_o\\_razvitii\\_i\\_tekushhej\\_situacii\\_v\\_](http://mtop.rk.gov.ru/file/Informacija_o_razvitii_i_tekushhej_situacii_v_)

- top-  
livno\_jenergeticheskom\_komplekse\_rk\_2014.pdf
4. A modern market of the electric power industry of the Russian Federation. – Moscow: ANO "Training center NP "market Council", 2012.
  5. Trends in the development of renewable energy sources in Russia and the world / Shkradyuk I. E. - Moscow:WWF-Russia,2010.
  6. The power system of the Republic of Crimea. The Ministry of fuel and energy of the Republic of Crimea, 2016.[http://old.invest\\_incrimea.ru/show\\_content.php?alias=passport\\_energy&mid=1&m2=465](http://old.invest_incrimea.ru/show_content.php?alias=passport_energy&mid=1&m2=465)
  7. Elistratov, V. V. Climatic factors renewable energy [Electronic resource] / V. V. Elistratov, E. M. Akentyeva, M. M. Borisenko: (St. Petersburg state Polytechnical University), 2010.

УДК621.311.1

## Автоматизация учета потребления электроэнергии в бытовом секторе как одно из важных направлений энергосбережения в электроэнергетике

О.Н. Титаренко<sup>1</sup>, Н.А. Куликова<sup>2</sup>, А.А. Чуклин<sup>3</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299015, Россия, <sup>1</sup>plotnykova198608@mail.ru, <sup>2</sup>vvkulikov@mail.ru, <sup>3</sup>chuklin53@mail.ru.

Статья поступила 26.09.2017 г.; после доработки 30.09.2017 г.

### Аннотация

Целью данной статьи является обоснование актуальности применения автоматизированной системы учета и контроля электроэнергии в бытовом секторе для повышения качества электроэнергии и точности ее учета. В рамках статьи автоматизация учета электроэнергии рассматривается как один из основных способов энергосбережения.

**Ключевые слова:** электроэнергетика, автоматизация учета электроэнергии, качество электроэнергии, потери электроэнергии, энергосбережение.

## Automation of electricity consumption measurement in the domestic sector as one of the important areas of energy saving in the power industry

O.N. Titarenko<sup>1</sup>, N.A. Kulikova<sup>2</sup>, A.A. Chuklin

Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University» Kurchatova Street, 7, Sevastopol, 299015, Russia, <sup>1</sup>plotnykova198608@mail.ru, <sup>2</sup>vvkulikov@mail.ru, <sup>3</sup>chuklin53@mail.ru.

Received 26.09.2017 y.; received in final form 30.09.2017 y.

### Abstract

The purpose of this article is to prove the relevance of the application of an automated system for the purposes of electric power measurement and controlling in the domestic sector to improve the quality of electric power and the accuracy of its measurement. In this article, automation of electricity measurement is considered as one of the main ways to save electric energy.

**Keywords:** electric power industry, automation of electricity measurement, electric power quality, energy losses, energy saving.

### Введение

Основной целью организации учета электрической энергии является процесс получения достоверной информации о количестве отпущенной и потребленной электроэнергии для решения финансовых расчетов за электроэнергию и мощность, определения и прогнозирования технико-экономических показателей по-

требления электроэнергии.

В настоящее время в бытовом секторе учет электроэнергии организован, в основном, на базе визуального снятия показаний приборов учета и ручной обработки этих показаний. Такой способ не позволяет получать необходимые достоверные и оперативные данные учета, правильно выполнять расчеты с потребителями электроэнергии, а также решать задачи умень-

шения потерь и оптимизации потребления электроэнергии на основе прогрессивных тарифных систем. Использование автоматизированных систем управления позволяет осуществлять точный и быстрый контроль потребления электроэнергии, повышая достоверность учета и оптимизируя затраты на ее использование.

В связи с постоянным удорожанием энергоресурсов необходимо вести разработку и внедрение комплекса мероприятий по энергосбережению, включающих, прежде всего, контроль поставки и потребления энергоресурсов, а также ограничение и снижение их доли в себестоимости продукции. Современная автоматизированная система контроля и учета электроэнергии (АСКУЭ) является измерительным инструментом, позволяющим экономически обоснованно осуществлять комплекс мероприятий по энергосбережению и своевременно его корректировать в условиях изменяющейся экономической среды. Автоматизация учета электропотребления является основой системы энергосбережения в электроэнергетике.

В связи с увеличением доли бытовых потребителей в общей структуре потребления электрической энергии особую важность приобретают вопросы, связанные с уменьшением потерь электроэнергии в быту и точностью ее учета. Поэтому вопрос применения АСКУЭ в бытовом секторе в последнее время приобретает все большую актуальность.

### Постановка цели научной работы

Задачей исследования является использование средств автоматизации для учета и контроля количества и качества электроэнергии в бытовом секторе. Рассмотрены различные варианты установки приборов учета с точки зрения повышения точности учета и исключения возможности безучетного потребления электроэнергии. Произведен анализ работы действующих систем учета и перспективы создания новых АСКУЭ, как необходимого звена для функционирования электроэнергетики.

### Организация учета электрической энергии в жилых домах

Уравнение баланса электроэнергии для многоквартирного жилого дома выглядит следующим образом [5]:

$$W_{\Sigma} = \sum W_{аб} + W_{общ} + W_{п}, \quad (1)$$

где  $W_{\Sigma}$  - суммарная потребляемая электрическая энергия в жилом многоквартирном доме;

$W_{аб}$  - электропотребление бытовых абонентов электроэнергии, которая расходуется на общедомовые нужды (лифт, общедомовое освещение и т. д.);

$W_{общ}$  - потери в линиях электроснабжения.

Из уравнения (1) видно, что коммерческий учет потребления электрической энергии в многоквартирном жилом доме может быть организован несколькими способами.

Первый способ заключается в возможности установки приборов учёта, входящих в состав информационной системы, только во вводных распределительных устройствах (ВРУ) многоквартирных домов и на отходящих фидерах трансформаторных подстанций 0,4 кВ [4].

В этом случае производится учет электропотребления всех абонентов в доме, а также определяются потери, возникающие при передаче электроэнергии к бытовым потребителям. Такую схему учета может предпочтительно применять в домах, эксплуатацией которых занимаются жильцы с образованием жилищного кооператива или иной аналогичной организации. В этом случае расчет за потребленную электроэнергию осуществляется между энергоснабжающей организацией и жилищным кооперативом.

Второй способ предполагает установку приборов учёта, которые входят в состав информационной системы, в квартирах абонентов и во вводных распределительных устройствах (ВРУ) [4]. В этом случае возможно осуществление ежемесячного анализа расхода энергии по каждой точке учёта.

Такой вариант учета электроэнергии в многоквартирном жилом доме является наиболее распространенным. В этом случае при исправных приборах учета и отсутствии хищений электроэнергии можно с достаточно большой точностью определить суммарное электропотребление жилого дома по формуле (1).

Однако на практике может возникнуть ситуация, когда у некоторых бытовых абонентов отсутствуют приборы учета (по причине выхода из строя и т.д.) или часть абонентов использует электроэнергию, минуя счетчик. В этом случае балансовое уравнение (1) приобретает следующий вид [5]:

$$W_{\Sigma} = \sum W_{аб} + W_{общ} + \sum W_{аб\ сч} + W_{х} + W_{п}, \quad (2)$$

где  $W_{аб\ сч}$ , - электропотребление без счетчика,

$W_{аб\ сч}$ , - безучетное потребление электроэнергии.

Способы безучетного потребления электроэнергии электроэнергии в жилом доме можно разделить на четыре основные группы: подключение к общедомовой электросети; подклю-

чение к электросети другого абонента; подключение к электросети до прибора учета и влияние на работоспособность прибора учета различными способами различными способами.

В первых двух случаях есть возможность определения использованной электроэнергии соответствующими приборами учета и произвести расчет. В третьем и четвертом вариантах хищение электроэнергии можно выявить только с помощью дополнительного балансного счетчика, установленного на линии, по которой осуществляется электроснабжение квартир.

Для решения задач, связанных с повышением точности учета электроэнергии в бытовом секторе и исключения возможности ее безучетного потребления, каждый многоквартирный жилой дом можно оснастить АСКУЭ, в состав которой будут входить однофазные электронные счетчики электроэнергии, расположенные у каждого абонента, трехфазные электронные счетчики электроэнергии, расположенные на линиях электроснабжения общедомовых потребителей и вводе в дом, устройства сбора и передачи данных (УСПД) и каналобразующая аппаратура [2].

Сбор данных с АСКУЭ жилого многоквартирного дома можно организовать двумя способами:

- дистанционным с помощью различных модемов (GSM, аналоговых, радио);
- при обходе контролерами всех домов для сбора информации с УСПД на переносной пульт или портативный компьютер.

Первый вариант предпочтительней, поскольку сбор информации может осуществляться круглосуточно, однако этот вариант является более финансовозатратным.

Функциональная схема автоматизированного дистанционного учета потребленной электроэнергии многоэтажного дома приведена на рисунке 1.

В коттеджных поселках, садоводческих и дачных кооперативах, система электроснабжения которых включает достаточно протяженные открытые линии электропередачи 10/0,4 кВ, производить безучетное потребление электроэнергии еще проще, чем в многоквартирных домах с защищенной и скрытой электропроводкой.

При использовании АСКУЭ конструктивные возможности системы позволяют устанавливать приборы учета как на опорах линий электропередачи, так и в доме бытового абонента. Также возможна установка шкафов вводных устройств (ШВУ), в которых размеща-

ется электросчетчик.

На каждый коттедж устанавливается один ШВУ, который содержит соответствующий электронный счетчик и PLC-модем, который осуществляет связь между УСПД и счетчиками по силовой сети 10/0,4 кВ. Кабели спуска с воздушных линий электропередачи защищены от несанкционированного доступа благодаря изолирующей и защитной оболочкам и подземному вводу в ШВУ.

Сбор данных учета на верхний уровень АСКУЭ возможен двумя способами: через сотовую GSM-связь (при ее отсутствии можно использовать телефонную связь, радиосвязь, PLC-связь по линиям электропередачи) либо через переносной компьютер, в который предварительно заносятся данные из счетчика при локальном подключении компьютера по месту установки счетчика.

Такая схема электроснабжения практически полностью исключает все варианты хищения электроэнергии потребителями, а дистанционный сбор данных через PLC-модемы и линии электропередачи обеспечивает точный контроль за работой систем учета.

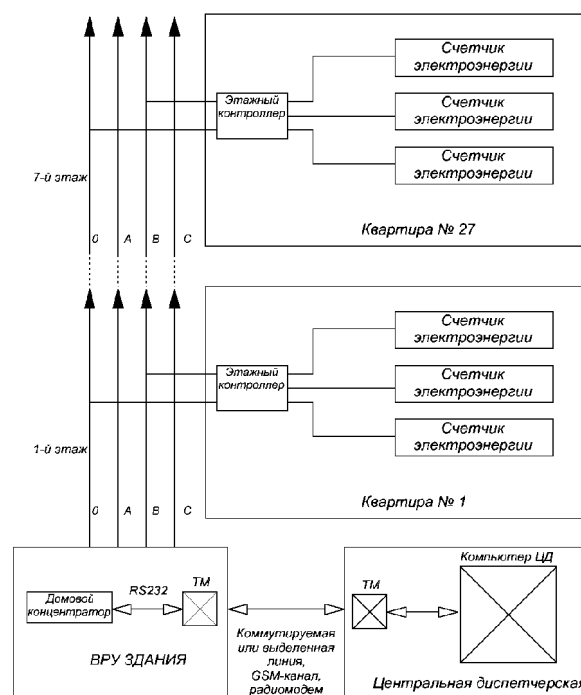


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированного дистанционного учета потребленной электроэнергии многоэтажного дома.

### Принцип работы и состав и АСКУЭ

Принцип работы АСКУЭ включает в себя следующие основные этапы:

- сбор данных о потребленной электроэнергии;
- передача данных по определенным каналам связи;
- обработка и анализ информации.

Исходя из вышеуказанных особенностей работы, современная система автоматизированного учета электроэнергии имеет следующую структуру:

- нижний уровень, состоящий из средств измерений и выполняющий функцию проведения измерений;
- средний уровень, включающий в себя устройства сбора и передачи информации и выполняющий функцию передачи информации по данному объекту или по группе объектов;
- верхний уровень, который включает в себя оборудование центра сбора данных или информационно-вычислительный комплекс (компьютер, контролер или сервер) и служит для сбора и хранения данных.

В состав АСКУЭ бытовых потребителей входят следующие устройства:

- счетчики электроэнергии, имеющие функцию хранения в энергонезависимой памяти промежуточных значений вычислений;
- устройства сбора и передачи данных (УСПД), которые выполняются в виде многоканальных электросетевых модемов (ЭСМ) с интерфейсным модулем и контроллером счетчиков, – для считывания, запоминания и передачи по электросети в локальный блок сбора информации с приборов учета;
- локальные блоки сбора данных (ЛБСД), служащие для управления работой электросетевых модемов, считывания из них показаний приборов учета, их накопления и передачи в центральную диспетчерскую, синхронизации «часов» автономных блоков.

В информационном центре диспетчерской службы осуществляется обработка показаний приборов учета, определение суммы платежей за потребленную электроэнергию с учетом социального статуса потребителя и выписывание счетов с учетом мультитарифного регулирования.

Передача информации может осуществляться с использованием: выделенных проводных линий, беспроводных радиочастотных, инфракрасных и радиорелейных линий, спутниковых каналов и т.д.

В последние годы ведется активная работа

по освоению новых способов передачи информации и построения на их основе специализированных автоматизированных систем сбора и обработки информации. К таким способам можно отнести распределенные силовые линии питания низкого, среднего и высокого напряжения. Такие каналы связи имеют следующие преимущества: низкая стоимость установки, поскольку не требуется прокладка специальных проводных линий связи, высокая скорость настройки коммутационной сети.

При выборе элементов АСКУЭ основное внимание уделяется качеству и безопасности связи между уровнями и стоимости системы. Обеспечение надежной, эффективной и недорогой системы доставки информации, которая определяет надежную и безопасную передачу и обмен данными, в том числе и между потребителями и продавцами энергии, является важным фактором выбора систем электроснабжения.

### **АСКУЭ бытовых потребителей в России**

Создание в России АСКУЭ бытовых потребителей актуально по целому ряду причин.

Прежде всего, это связано с процессами либерализации рынка электроэнергии, которые активно происходят в России.

После ликвидации существующего в России перекрестного субсидирования и отказа от системы самообслуживания перед российскими энергетиками обязательно возникают проблемы минимизации собственных затрат на снятие показаний счетчиков и выписку счетов потребителям.

Также решения требуют вопросы, связанные с заключением персональных договоров на условия поставки электроэнергии с каждым бытовым потребителем.

Организации энергосбыта в условиях реструктуризации и жесткой конкуренции смогут нормально экономически функционировать только, предлагая своим потребителям гибкие взаимовыгодные тарифные системы, дифференцированные как по уровням потребления, так и по времени. АСКУЭ помогут внедрять любые тарифные системы с наименьшими затратами.

Существующие системы автоматизации учета можно условно разделить на две группы. К первой относятся АСКУЭ со сбором телеметрической информации в электросетевую компанию (по силовой сети, радиоканалам, с помощью сотовой GSM-связи). Ко второй группе относятся АСКУЭ на основе счетчиков с про-

граммируемыми смарт-картами и возможностью коммутации нагрузки. Обе системы имеют определенные преимущества и недостатки.

Одной из ведущих компаний по внедрению АСКУЭ для бытовых потребителей является компания ENEL — итальянский монополист в области энергосбытовой деятельности. Разработками систем АСКУЭ занимаются многие российские компании.

В России имеется около 10 отечественных разработок систем АСКУЭ бытовых потребителей с использованием PLC-технологии. Наиболее известные из них производятся на Московском заводе электроизмерительных приборов (МЗЭП) и в ИАЦ НТИ «Континиум» (Москва). Десятки уже внедренных пилотных проектов подтверждают их работоспособность и эффективность в повышении сбора платежей за потребленную электроэнергию. Срок окупаемости таких систем составляет 3–4 года.

Самым крупным российским проектом в этой области, реализующимся сегодня, является проект в г. Хабаровске.

В ОАО «Хабаровскэнерго» создана автоматизированная система учета потребления электроэнергии бытовыми потребителями. Система построена на базе технических средств сбора данных по силовой сети 0,4 кВ фирмы «Континиум» от специально модернизированных для этих целей электронных однофазных счетчиков завода МЗЭП. Проект финансируется через тарифную составляющую и имеет срок проектной окупаемости 4 года.

Также производителями АСКУЭ являются следующие предприятия: ОАО «МЗЭП» г. Москва, ЗАО «Кварц», г. Нижневартовск (АСКУЭ «Спрут»), АО «ЛЭМЗ», г. Санкт-Петербург (АСКУЭ «Полиграф-А»), НПО «Симметрон», г. Санкт-Петербург (АСКУЭ «Кредо-Смарт-500»), ЗАО «Мобильные решения», г. Нижний Новгород.

В настоящее время предприятия Российской федерации производят широкую гамму трехфазных электронных и микропроцессорных электросчетчиков, позволяющих использовать их в системах АСКУЭ.

Основными изготовителями являются: ОАО «Концерн Энергомера» (г. Ставрополь), СП АББ-ВЭИ «Метроника» (г. Москва), Мытищинский электротехнический завод (Московская обл.), Нижегородский завод им. Фрунзе, Государственный Рязанский приборный завод.

Использование вышеуказанных разработок новых систем учета электроэнергии находит все более широкое распространение в ряде регио-

нов России: в Москве и Московской области, в Краснодарском крае, на Дальнем Востоке и др.

Современные системы АСКУЭ успешно эксплуатируются в более чем в сорока АО-энерго России и имеют статус коммерческих систем. Если раньше информация, получаемая с помощью применения АСКУЭ, использовалась как справочная и как информация для технического учета, то в эксплуатируемых в настоящее время коммерческих системах эту информацию используют для финансовых расчетов на общероссийском оптовом рынке электрической энергии и мощности, а также для расчетов с потребителями.

### Заключение

Применение АСКУЭ в бытовом секторе позволяет производить:

- контроль за состоянием бытовых сетей с целью обнаружения несанкционированного потребления электроэнергии;
- мониторинг потребления и своевременную оплату за электроэнергию бытовыми потребителями;
- регулирование потребления электроэнергии путем отключения должников от электросетей;
- составление баланса электроэнергии по районам, подстанциям, домам;
- планирование энергопотребления в сетях собственника электроэнергии.

Решение этих задач, а также экономия затрат контролеров и инспекторов в связи с реструктуризацией РАО «ЕЭС России» и доведения тарифов у населения до уровня себестоимости электроэнергии, позволяет сделать вывод о том, что использование АСКУЭ в бытовом секторе определяет одно из направлений энергосбережения в энергетике.

Рост доли бытовых потребителей в общем энергопотреблении также делает использование современных систем качественного учета электроэнергии экономически выгодным.

Учитывая тот факт, что бытовой сектор России насчитывает более 30 миллионов абонентов, использование автоматизированных систем учета электроэнергии в жилищно-коммунальном хозяйстве имеет широкие перспективы.

Системы АСКУЭ, применяемые в бытовом секторе, в основном состоят из отечественных комплектующих, но могут использоваться и зарубежные разработки.

Однако следует отметить тот факт, что рос-

сийские разработчики наиболее перспективных отечественных автоматизированных систем учета потребления электроэнергии бытовыми потребителями разрознены и их разработки недостаточно финансируются.

and their role in the structure of commercial losses. Energy saving and water treatment. - 2006. - No. 4. - P. 50 - 52.

### Список литературы

1. ГОСТ Р 54149–2010. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ. 2012.
2. Буренков Е. В. Автоматизированные системы учета потребления энергоресурсов в условиях либерализованного рынка // Вестник Госэнергонадзора, 2001, № 1.
3. В. Н. Апряткин. Потери электроэнергии в городских электрических сетях и технологии их снижения: сб. ст. - Москва, «Мособлэлектро», 12 - 15 апр. 2004 г.
4. В. Э. Воротницкий, В. Н. Апряткин/ Коммерческие потери электроэнергии в электрических сетях. Структура и мероприятия по снижению. Новости электротехники. Информационно-справочное издание. - 2002. - № 4.
5. Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2005. - 280 с.: ил.
6. Сапронов, А. А. Способы хищения электроэнергии и их роль в структуре коммерческих потерь. Энергосбережение и водоподготовка. - 2006. - № 4. - С. 50 - 52.

### References

1. GOST R 54149-2010. Electric Energy. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards for the quality of electrical energy in general-purpose power supply systems. Moscow: Standartinform. 2012.
2. Burenkov, EV. Automated systems for recording energy consumption in a liberalized market, Vestnik Gosenergonadzora, 2001, no. 1.
3. VN Apratkin. Electricity losses in urban electric grids and the technology of their reduction: Sat. Art. - Moscow, Mosoblelektro, 12 - 15 April. 2004
4. VE Vorotnitsky, VN Apryatkin / Commercial losses of electric power in electrical networks. Structure and measures for reduction. News of electro-technology. Information-reference edition. - 2002. - № 4.
5. Yu. S. Zhelezko, AV Artemiev, O. V. Savchenko. Calculation, analysis and normalization of electricity losses in electrical networks: A guide for practical calculations. - Moscow: Izd-vo NTs ENAS, 2005. - 280 с.: ill.
6. Sapronov, AA Methods of theft of electric power

УДК.629.313.323

## Влияние факторов синхронизации на качество переходного процесса при включении синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой

А.В. Углов, Е.В. Гусева, М.Б. Углова

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, marina.uglova.1963@mail.ru

Статья поступила 09.10.2017 г.; после доработки 12.10.2017 г.

### Аннотация

В настоящее время устройства точной автоматической синхронизации допускают погрешности по углу включения и наличие частоты скольжения в момент синхронизации, что сокращает срок эксплуатации генераторных агрегатов. Исследовано влияние вышеуказанных факторов синхронизации на качество переходного процесса включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.

**Ключевые слова:** синхронный генератор, энергосистема, факторы синхронизации, частота скольжения, угол включения.

## Synchronization factors influence on the transitional process quality of synchronous generator powering on parallel work with powerful network

A.V. Uglov, E.V. Guseva, M.B. Uglova

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
marina.uglova.1963@mail.ru

Received 09.10.2017 y.; received in final form 12.10.2017 y.

### Abstract

Presently the devices of exact automatic synchronization assume errors on the corner of including and presence of frequency of sliding in the moment of synchronization, that abbreviates the term of exploitation of generator aggregates. Influence of foregoing factors of synchronization on quality of transitional process of including of synchronous generator on parallel work with a grid is explored

**Keywords:** synchronous generator, grid, factors of synchronization, frequency of sliding, corner of including.

### Введение

Режим параллельной работы синхронного генератора с энергосистемой связан с необходимостью выполнения процесса синхронизации генератора и энергосистемы при включении его на параллельную работу с энергосистемой. Современные устройства точной синхронизации с целью обеспечения условий совпадения напряжений синхронного генератора  $\underline{U}_g$  и энергосистемы  $\underline{U}_c$  по фазе при включении генератора на

параллельную работу осуществляют синхронизацию с разницей частот генератора и энергосистемы и выдают управляющее воздействие на включение привода выключателя синхронизируемого генератора с опережением от момента совпадения по фазе векторов  $\underline{U}_g$  и  $\underline{U}_c$  на величину собственного времени включения выключателя генератора. Из-за сложности процесса синхронизации в реальных условиях включения генератора на параллельную работу практически всегда происходит при некотором угле

сдвига между векторами  $\underline{U}_z$  и  $\underline{U}_c$ , который, как правило, обозначается  $\delta_\phi$  и имеет название «угол включения». Даже современные достаточно совершенные автоматические устройства точной синхронизации не обеспечивают равенства нулю угла включения  $\delta_\phi$ . По этой причине синхронный генератор после включения на параллельную работу подвергается динамическим воздействиям различного уровня. На них также накладываются воздействия, связанные с наличием разности частот и напряжений генератора и энергосистемы.

### Постановка цели научной работы

Задачей исследования является определение влияния факторов синхронизации при включении синхронного генератора на параллельную работу с мощной энергосистемой в реальных условиях эксплуатации в настоящее время.

### Вывод математической модели режима

Идеальным вариантом для безударного включения и последующей устойчивой работы является совпадение мгновенных значений напряжений синхронизируемого генератора и энергосистемы, т.е.  $u_z = u_c$ . Это определяет следующие условия включения синхронных генераторов па параллельную работу:

- 1) формы кривых напряжений  $u_z$  и  $u_c$  должны быть одинаковыми;
- 2) порядок чередования фаз должен совпадать;
- 3) действующие значения синхронизируемых напряжений должны быть равны между собой:  $U_z = U_c$ ;
- 4) частоты должны быть одинаковыми  $f_z = f_c$ ;
- 5) напряжения генератора и энергосистемы должны совпадать по фазе.

Выполнение первого условия обеспечивает конструкция генераторов. Второе условие выполняется при монтаже, а остальные — в зависимости от того, как производятся операции, связанные с включением генератора на параллельную работу.

Несоблюдение одного из условий точной синхронизации приводит к следующим последствиям.

*Неравенство напряжений.* Включение генераторов на параллельную работу при разно-

сти напряжений генераторов  $\Delta U = U_z - U_c$ , равенстве частот и совпадении фаз приведёт к возникновению уравнительного тока, отстающего от вектора разности напряжений на  $90^\circ$ , поскольку индуктивные сопротивления генераторов значительно превышают активные сопротивления обмоток. Уравнительный ток по отношению к генератору с большей ЭДС практически является индуктивным и, создавая продольную размагничивающую реакцию якоря и стремится уменьшить его ЭДС.

По отношению к генератору с меньшей ЭДС уравнительный ток является ёмкостным, и вследствие действия продольной намагничивающей реакции якоря стремится увеличить его ЭДС. За счёт этого происходит выравнивание ЭДС параллельно работающих генераторов. В этом случае не создаётся толчков активной мощности, однако, при достаточно большом значении уравнительных токов возникают динамические усилия в лобовых частях и витках обмотки статора, что может привести к их механическим повреждениям.

Учитывая допустимость незначительных по величине толчков тока во время синхронизации при включении на параллельную работу, считают вполне приемлемым значение разности напряжений  $\Delta U$  до 10% от номинального значения. Кроме того, современные автоматические системы регулирования напряжения обеспечивают точность его поддержания в пределах  $\pm(1 - 3)\% U_n$  в статических режимах, что практически полностью снимает необходимость рассмотрения данного фактора синхронизации.

*Неравенство частот.* В случае включения на параллельную работу при неравенстве частот один из агрегатов будет иметь некоторый запас избыточной кинетической энергии, под действием которой его ротор начнёт опережать ротор другого и, таким образом, будет воспринимать уравнительную активную мощность, определяемую значениями тока и ЭДС в переходном режиме.

Уравнительная мощность вызывает на валу генератора вращающий момент, который может в некоторых случаях превышать номинальный момент в несколько раз.

Если включение было произведено даже в момент совпадения фаз и при равенстве напряжений синхронизируемых генераторов, ротор первого генератора под влиянием избытка кинетической энергии будет двигаться с ускорением относительно ротора второго генератора до тех пор, пока не израсходует запас кинетиче-

ской энергии. Толчки уравнивающей мощности в этом случае отрицательно влияют как на всю систему, так и на синхронизируемый генератор в первую очередь.

**Несовпадение фаз.** Наличие сдвига фаз при равенстве частот и напряжений создаёт, главным образом, активные уравнивающие токи. Уравнивающий ток отстаёт от вектора разности напряжений на угол  $\approx 90^\circ$ , почти совпадает по фазе с  $\underline{U}_\Sigma$  и имеет существенную по значению активную составляющую, что и вызывает толчки активной мощности в момент включения генераторов.

Неравенство напряжения энергосистемы и ЭДС подключаемого генератора в настоящее время является вполне преодолимым фактором. Соблюдение чередования фаз синхронизируемых элементов выполняется в процессе постройки нового генераторного агрегата.

Не выполняемыми в настоящее время факторами соблюдения условий точной автоматической синхронизации являются оставшиеся два.

Неравенство частот синхронизируемых элементов вызвано требованием к техническим условиям работы существующих автосинхронизаторов, использующих в принципе своей работы огибающую напряжения бисений, так и её производные.

Несовпадение фаз синхронизируемых напряжений является объективной технической погрешностью.

Таким образом устранимыми факторами, уменьшающими механические воздействия на синхронизируемый генераторный агрегат, могут быть два: устранение неравенства частот синхронизируемых элементов и погрешности по углу включения.

Для исследования влияния каждого из этих факторов на качество переходного процесса включения синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью была выбрана математическая модель, предложенная в [1], а критерием оценки качества переходного процесса – интегральное динамическое воздействие (1), предложенное в [2]:

$$DV = \int_0^{t_{\text{нм}}} |M_{\Sigma}| \cdot dt \quad \text{о.е.} \cdot \text{с} \quad (1)$$

Предложенный показатель оценки качества переходного процесса в виде интеграла от модуля электромагнитного момента за время переходного процесса позволяет произвести сравнительный анализ качества включения синхронных генераторов различной мощности при

включении их на параллельную работу с мощной сетью при нарушении одного или нескольких факторов синхронизации.

### Оценка качества переходного процесса при наличии частоты скольжения

Произведён сравнительный анализ для неявнополюсных синхронных генераторов в диапазоне мощностей от 6 до 1000 МВт. Исследовались двухполюсные синхронные генераторы при частоте скольжения в момент включения от минус 2,0 Гц до + 2,0 Гц через 0,1 Гц. Произведена оценка влияния знака частоты скольжения на величину интегрального динамического воздействия на генератор за время переходного процесса.

Для каждого значения частоты скольжения производилось сравнение интегрального динамического воздействия при её положительном и отрицательном значении. Обобщённые результаты приведены в таблице 1.

**Таблица 1.** Оценка качества переходного процесса в зависимости от частоты скольжения в диапазоне от минус 2,0 Гц до + 2,0 Гц в момент включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.

| Показатель                                                                                                                                    | Тип генератора |        |         |         |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------|---------|---------|----------|
|                                                                                                                                               | TBC-6          | TBC-32 | TBB-200 | TBB-500 | TBB-1000 |
| Среднее значение разницы значения интегрального динамического воздействия в диапазоне от минус 0,5 Гц до 0,5 Гц по типам генераторов, %       | 0,717          | 0,982  | 0,026   | 0,098   | 0,080    |
| Среднее значение разницы значения интегрального динамического воздействия в диапазоне от минус 0,5 Гц до 0,5 Гц для всех типов генераторов, % | 0,043          |        |         |         |          |

Малая величина среднего значения разницы интегрального динамического воздействия свидетельствует об относительной независимости знака частоты скольжения в момент включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.

С этой целью более детально был рассмотрен реальный диапазон частот скольжения, а именно от минус 0,5 до + 0,5 Гц. Результаты приведены в таблице 2.

**Таблица 2.** Оценка качества переходного процесса в

зависимости от частоты скольжения в диапазоне от минус 0,5 до + 0,5 Гц в момент включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.

| Показатель                                                                                                                                    | Тип генератора |        |         |         |          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|--------|---------|---------|----------|
|                                                                                                                                               | TBC-6          | TBC-32 | TBB-200 | TBB-500 | TBB-1000 |
| Среднее значение разницы значения интегрального динамического воздействия в диапазоне от минус 2,0 Гц до 2,0 Гц по типам генераторов, %       | 1,677          | 0,254  | 0,050   | 0,295   | 0,216    |
| Среднее значение разницы значения интегрального динамического воздействия в диапазоне от минус 2,0 Гц до 2,0 Гц для всех типов генераторов, % | 0,498          |        |         |         |          |

Полученный результат по всем типам генераторов свидетельствует о том, что в диапазоне от минус 0,5 до + 0,5 Гц величина интегрального динамического воздействия незначительно меньше для отрицательного значения частоты скольжения, т.е. в том случае, когда частота генератора в момент синхронизации меньше частоты энергосистемы.

#### Оценка качества переходного процесса при наличии угла включения

Произведён сравнительный анализ для неявнополюсных синхронных генераторов в диапазоне мощностей от 6 до 1000 МВт.

Исследовались двухполюсные синхронные генераторы при угле включения от 0° до 180° через 10°.

При этом было установлено, что максимальное значение относительного значения момента при несинхронном включении синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью находится в диапазоне от 130° до 140°, а не как было указано в [3] 120°.

Значение угла включения, при котором синхронизирующий момент имеет максимальное значение, приведены в таблице 3.

Для вышеуказанных типов генераторов было рассмотрено влияние знака угла синхронизации в момент включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.

Диапазон угла включения был рассмотрен от минус 10 до + 10°, а также отдельно от минус 5 до + 5°. Окончательные результаты приведены

в таблице 4.

**Таблица 3.** Значение угла несинхронного включения, соответствующее максимальному значению электромагнитного момента в момент несинхронного включения генератора на параллельную работу с энергосистемой.

| Тип генератора                | TBC-6 | TBC-32 | TBB-200 | TBB-500 | TBB-1000 |
|-------------------------------|-------|--------|---------|---------|----------|
| Значение угла включения, град | 138,0 | 136,5  | 135     | 134,5   | 134      |

Вышеуказанное может быть объяснено следующим:

При определении максимального значения синхронизирующего момента при несинхронном включении неявнополюсного синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью в [3] были приняты следующие допущения:

- не учитывалось влияние ускорения на значение электромагнитного момента;
- контуры в роторе генератора приняты сверхпроводящими, т.е. без учёта затухания наведённых в них токов;
- не учитывалось затухание апериодической составляющей тока статора.

Таким образом, можно прийти к следующему заключению, что при рассмотрении процесса включения в диапазоне от минус 10 до +10° наиболее целесообразно включение синхронного генератора мощностью от 6 до 1000 МВт на параллельную работу с мощной сетью при отрицательном значении угла включения, т.е. когда вектор ЭДС генератора отстаёт от вектора напряжения энергосистемы, так как при этом среднее значение интегрального динамического воздействия имеет положительное значение.

При рассмотрении процесса включения в диапазоне от минус 5 до +5° также целесообразно включение синхронных генераторов данного уровня мощности на параллельную работу с мощной сетью при отрицательном значении угла включения. Однако устойчивой закономерности при этом не наблюдается. По этой причине знак угла включения по результатам математического исследования не оказывает существенного влияния на качество переходного процесса при включении неявнополюсного синхронного генератора на параллельную работу с мощной энергосистемой.

**Таблица 4.** Значение величины погрешности значения интегрального динамического воздействия в зависимости от знака угла включения.

| Угол включения,<br>град/рад                          | Погрешность значения интегрального динамического воздействия<br>от знака угла включения, % |         |          |          |          |
|------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------|----------|----------|----------|
|                                                      | ТВС-6                                                                                      | ТВС-32  | ТВВ-200  | ТВВ-500  | ТВВ-1000 |
| 10/0,174833                                          | +3,244                                                                                     | +0,625  | +0,413   | +1,256   | +0,116   |
| 9/0,15735                                            | +2,221                                                                                     | +0,567  | +0,366   | +0,211   | +0,070   |
| 8/0,13987                                            | +2,4336                                                                                    | +0,518  | +0,316   | +0,166   | +0,019   |
| 7/0,12238                                            | +2,703                                                                                     | +0,472  | +0,267   | +0,116   | - 0,040  |
| 6/0,10490                                            | +3,082                                                                                     | +0,428  | +0,213   | +0,061   | - 0,107  |
| 5/0,08742                                            | +3,627                                                                                     | +0,391  | +0,156   | 0        | +0,460   |
| 4/0,06993                                            | +4,458                                                                                     | +0,361  | +0,093   | - 0,076  | - 0,470  |
| 3/0,05245                                            | +5,848                                                                                     | +2,592  | +0,021   | - 0,184  | - 0,760  |
| 2/0,03497                                            | +8,588                                                                                     | +0,387  | - 0,081  | - 0,281  | +0,053   |
| 1/0,01748                                            | +17,412                                                                                    | +2,181  | - 0,302  | +0,167   | +0,133   |
| Среднее значение по 10° по<br>типам генераторов      | +5,361                                                                                     | +0,810  | +0,146   | +0,144   | - 0,053  |
| Среднее значение по 10° по<br>всем типам генераторов | +1,28173                                                                                   |         |          |          |          |
| Среднее значение по 5° по<br>типам генераторов       | +7,9865                                                                                    | +1,1826 | - 0,0228 | - 0,0748 | - 0,1167 |
| Среднее значение по 5° по<br>всем типам генераторов  | +1,7909                                                                                    |         |          |          |          |

### Оценка качества переходного процесса при наличии угла включения и частоты скольжения

Произведён сравнительный анализ несинхронного включения для неявнополусных синхронных генераторов при наличии одновременной погрешности как по углу включения в реальном диапазоне угла включения и частоты скольжения.

Рассматриваемый диапазон находился в пределах от минус 0,4 до + 0,4 Гц и от минус 0,2 до + 0,2 рад.

Рассматривались результаты переходного процесса на 0,5 с, 1,0 с, 2,0 с и 3,0 с переходного процесса.

При этом рассматривалось влияние как отдельного фактора синхронизации, определённое по выражению (1), так и их совместное действие, определённое по выражению (2).

$$DV_{\Sigma} = \sqrt{DV_{\delta}^2 + DV_f^2}, \quad (2)$$

где  $DV_{\delta}$  – интегральное динамическое воздействие по углу включения;

$DV_f$  – интегральное динамическое воздействие по частоте скольжения.

Результаты расчёта представлены в таблицах 5 и 6.

Приведённые в таблицах 5 и 6 результаты

свидетельствуют о независимости влияния каждого из факторов синхронизации на качество переходного процесса при несинхронном включении синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.

**Таблица 5.** Средняя погрешность включения по четырём вариантам включения за 3,0 с по типам генераторов.

| Тип генератора   | Значение погрешности, % |
|------------------|-------------------------|
| ТВС-6-2УЗ        | - 0,1475                |
| ТВС-32-2УЗ       | - 0,7775                |
| ТВВ-200-2УЗ      | + 2,755625              |
| ТВВ-500-2УЗ      | + 1,260625              |
| ТВВ-1000-2УЗ     | + 1,7325                |
| Среднее значение | 0,927625                |

**Таблица 6.** Средняя погрешность включения по четырём вариантам включения по времени переходного процесса для всех типов генераторов.

| Время, с | Значение погрешности, % |
|----------|-------------------------|
| 0,5      | 1,0365                  |
| 1,0      | 1,236                   |
| 2,0      | 0,8895                  |
| 3,0      | 0,5485                  |

### Заключение

1. Знак частоты скольжения не оказывает существенного влияния на качество переход-

- ного процесса включения синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой.
2. Максимальное значение синхронизирующего момента для неявнополюсных синхронных генераторов находится в диапазоне от  $134$  до  $138^\circ$ , а не  $120^\circ$ , как это указано в [3].
  3. Включение синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой наиболее целесообразно производить при отрицательном угле включения, т.е. когда частота генератора менее частоты энергосистемы. Однако данный факт в диапазоне мощностей генераторов от  $6$  до  $1000$  МВт не носит устойчивой закономерности.

### Список литературы

1. Углов А.В. Оптимизация математического описания переходного процесса включения синхронного генератора на параллельную работу с мощной сетью // 36. наук. пр. СТУЯЕтаП. – Севастополь: СТУЯЕтаП, 2009. – Вип. 4(32). – С.184-191.
2. Углов А.В. Анализ переходных процессов при включении синхронного генератора на параллельную работу с энергосистемой /А.В.Углов, В.А.Лесник// 36. наук. пр. СТУЯЕтаП. – Севастополь: СТУЯЕтаП, 2004. – Вип. 13. – С.273-281.
3. Хачатуров А.А. Несинхронные включения и ресинхронизация в энергосистемах.–2-е изд., перераб. и доп. / А.А.Хачатуров. – М.: Энергия, 1977. – 176 с.

### References

1. Uglov A.V. Optimization of mathematical description of transitional process of including of synchronous generator on parallel work with a powerful network. *Sb.nauch.tr. SNUYaE i P*, Sevastopol, SNUYaE i P, 2009, No.4(32), pp.184-191.
2. Uglov A.V. Analysis of transitional processes at including of synchronous generator on parallel work with a network/A.V. Uglov, V.A.Lesnik// *Sb.nauch.tr. SNUYaE i P*, Sevastopol, SNUYaE i P, 2004, No.13, pp.273-281.
1. Hachaturov A.A. unsynchronous including and resynkhronyzatsyya in network.–2-e publ., pererab. and dop. / A.A. Hachaturov. M.; *Energyekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [Safety and issues of the WWER nuclear installation operation engineer assistance]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2013, 304 p.
2. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek. *Fizicheskie i konstruktivnye osobennosti yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [WWER nuclear installa-

- tions physical and specific design features]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2011, 376 p.
3. Braslavskiy Yu.V., Matuzaev K.B., Trigub M.A. Research of the Reactor Core Construction and Condition Impact on the Recriticality Attainment. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* [Energy installations and technologies]. Sevastopol', FAEI HE STU Publ., 2016, Vol. 2, No 3, pp.5-10.

---

**НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

---

УДК 621.92

**Исследование автономной фотоэлектрической установки**В.В. Кувшинов<sup>1</sup>, А.М.Шестернёва<sup>2</sup>, С.С. Чердаков<sup>3</sup>ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>kuvshinov.vladimir@gmail.com, <sup>2</sup>aleksandra0784@mail.ru

Статья поступила 20.11.2017 г.; после доработки 25.11.2017 г.

**Аннотация**

Приведены результаты экспериментальных исследований автономной фотоэлектрической станции для обеспечения индивидуального потребителя. Приводятся результаты теоретических и экспериментальных исследований работы установки с аккумуляторной станцией. Исследованы различные режимы работы станции.

**Ключевые слова:** автономная фотоэлектрическая станция, фотоэлектрический преобразователь, аккумуляторная батарея, фотоэлектрические модули, солнечная энергетика.

**Study of an autonomous photovoltaic system**V.V. Kuvshinov<sup>1</sup>, A.M. Shesterniova<sup>2</sup>, S.S. CherdakovFAOU VO "Sevastopol State University", ul. University, 33,  
Sevastopol, 299053, Russia, <sup>1</sup>kuvshinov.vladimir @ gmail.com, <sup>2</sup>aleksandra0784 @ mail.ru

The article was received on November 20, 2012; after completion on November 25, 2017.

**Abstract**

The results of experimental studies of an autonomous photovoltaic station for providing an individual consumer are presented. The results of theoretical and experimental studies are presented.

**Keywords:** autonomous photovoltaic station, photoelectric converter, battery, photovoltaic modules, solar energy.

**Введение**

Имеющиеся в Крыму солнечные фотоэлектрические станции передают выработанную электроэнергию непосредственно в общую энергосистему [1]. Однако непостоянство потока солнечной энергии приводит к неравномерной выработке энергии этими станциями, и как следствие оказывает негативное воздействие на электрические сети и подстанции. Также эти электростанции не решают задачу надёжного поставщика электрической энергии для Крыма. В условиях нынешнего положения в сфере

электроснабжения Крыма настала пора в срочном порядке устанавливать дополнительные мощности по выработке электрической энергии, как для промышленных объектов, так и для индивидуальных потребителей [2]. В частности многие жилые дома уже обеспечены бензиновыми и дизельными генераторами небольшой мощности от 1 до 5 кВт и более. Однако все эти меры не предусматривают того, что для эффективной работы этих систем необходимо постоянное энергообеспечение полуострова традиционными энергоресурсами (углеводородами) в размерах значительно превышающих их плано-

вые поставки. В условиях не только энергетической, но и транспортной блокады полуострова эти поставки становятся не только дорогостоящими, но и проблематичными. С учетом всего выше сказанного развитие альтернативных (ветровых и солнечных) энергоустановок в Крыму является одной из приоритетных задач.

Из-за постоянных перебоев с электроснабжением многие потребители в Крыму установили аккумуляторные системы для бесперебойного электроснабжения. При оснащении аккумуляторных систем жилых домов фотоэлектрическими модулями можно значительно снизить электропотребление в масштабах Крыма, а также обеспечить автономное электроснабжение индивидуальных потребителей[2]. Чтобы изучить возможность использования фотоэлектрических систем с аккумуляторной станцией для обеспечения потребителей необходимо провести исследования в натурных условиях при использовании заводского оборудования.

### Постановка задачи исследования

Задачами исследования ставились изучение вольт-амперных и мощностных характеристик модулей при совместной работе с аккумуляторами. Исследования проводились на кафедре Возобновляемые источники энергии и электрические системы и сети в Севастопольском государственном университете.

Для обеспечения частного жилого дома нами была предложена установка (рис. 1, а), состоящая из двух фотоэлектрических модулей Российского производства PS-250 (рис. 1, б). Мощность каждого модуля по 250 Вт, ток в рабочей точке 8,2, напряжение 30,6 В. Этой мощности хватает для зарядки двух аккумуляторных батарей емкостью по 60 Ач. Зарядный ток этих аккумуляторов до 5А, напряжение 12- 14 В. При зарядке этих аккумуляторов используется контроллер. Все 4 аккумулятора (по 2 на каждый модуль) расположены на чердачном помещении здания, где также находится система управления.

### Цель и задачи исследования

Целью данной работы являлось исследование увеличения эффективности существующих на полуострове солнечных установок для промышленных и частных объектов.

Для достижения поставленной цели было рассмотрено электроснабжение коттеджа. Схема силовой части электроснабжения коттеджа приведена на рис. 2.



а



б

Рис. 1. Автономная солнечная установка (а), фотоэлектрический модуль PS-250 (б)

Площадь фотоэлектрической установки (ФЭУ), состоящей из 2-х модулей составляет  $3\text{ м}^2$ . Значения солнечной инсоляции принимаем для широты Севастополя ( $44^\circ\text{с.ш.}$ ). При использовании фотоэлектрических преобразователей на основе кристаллического кремния с практическим КПД – 17% можно достичь максимальной мощности ФЭУ 0,5 кВт. Среднее время активного солнечного излучения считаем 8 часов (с 8 до 16 часов). Соответственно выработка не более 4 кВт ч.

Как видно из схемы электроснабжения солнечная установка, включая и аккумуляторы, должна обеспечивать только неотключаемую нагрузку (ЩНН-0,4).

Для расчета элементов схемы надо составить суточный график нагрузки неотключаемых потребителей.

Время работы выбрано ориентировочно для семьи из 3-х человек, предполагаем, что днём в доме жильцы отсутствуют.

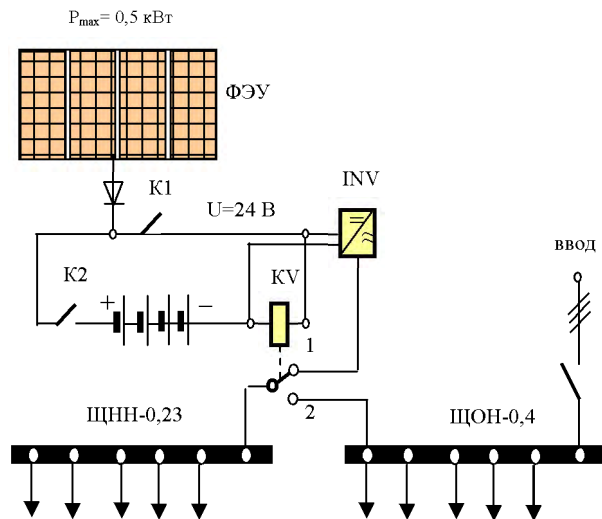


**Рис. 2.** Силовая часть схемы электроснабжения коттеджа: АБ - аккумуляторная батарея; INV- инвертор; KV - реле напряжения; K1, K2 – выпрямители; ЩНН - шина, питающая коттедж; ЩОН - шина городской сети.

Найдем энергию, которую израсходовали за сутки неотключаемые электрические приборы (ЭП):

- 1)  $0,15 \cdot 7 = 1,75 \text{ кВт.ч;}$
- 2)  $0,085 \cdot 2 + 0,25 \cdot 5 = 1,42 \text{ кВт.ч;}$
- 3)  $0,2 \cdot 24 \cdot 0,4 = 0,192 \text{ кВт.ч}$  (0,2 – коэффициент использования);

$$4) 0,2 \cdot 5 = 1 \text{ кВт.ч;}$$

$$5) 0,2 \cdot 0,25 = 0,5 \text{ кВт.ч;}$$

Итого: 3,98 кВт.часа.

После инвертора ( $\eta_{\text{ин}} = 0,94$ )

$$W_{\text{эл}} = 3,7 \text{ кВт.ч.}$$

Если представить энергию, вырабатываемую ФЭУ в виде синусоиды (или треугольника), основанием которой является время, равное 8-ми часам, а высота составляет 0,5 кВт, то эта энергия составит приблизительно:  $0,5 \cdot 4 = 2 \text{ кВт ч.}$

Аккумуляторные батареи (АБ) выбираем из условия, что они обеспечат электроэнергией коттедж в вечернее и ночное время, а в дневное будут заряжаться от модуля. Рассматриваем из всех потребителей коттеджа только неотключаемые, емкость их принимаем с коэффициентом 0,18.  $W_{\text{эл}} = 3,7 \cdot 0,18 = 0,66 \text{ кВт ч.}$

При напряжении сети постоянного тока равном 12В необходимая емкость составит:

$$C_{\text{ном}} = \frac{W}{U} = \frac{66}{12} = 5,5 \text{ Ач.}$$

*Выбор аккумуляторных батарей (АКБ):*

АКБ можно выбрать герметизированные фирмы «SUNLIGIN» серии SP62 штуки. Заряд в течение 12 часов током 6А.

Защита от глубокого разряда – реле напряжения KV. Конечное напряжение разряда на одну банку 1,75 В.

KV при снижении напряжения на АБ до конечного (12 В) отключает инвертор и подключает ЩНН к основному щиту питания (ЩОН). Таким образом получаем, что модуль солнечной установки заряжает 2 аккумуляторные батареи по 12 В, соединенных параллельно, что дает нам увеличение емкости до требуемого значения.

В данной разработке применены аккумуляторные батареи серии SUNLIGHT (Салайт) SPb. Аккумуляторы Салайт этой серии представляют собой надежный источник энергоснабжения для систем бесперебойного питания, телекоммуникаций, систем информационных технологий и источников бесперебойного питания (ИБП, UPS, упрс).

Герметичная свинцово-кислотная аккумуляторная батарея является батареей перезаряжаемых элементов с предохранительным клапаном, позволяющим снизить внутреннее давление в случае перезарядки. Такой тип аккумуляторных батарей не требует технического обслуживания, так как в течение срока службы нет необходимости проверять уровень электролита или добавлять воду.

Серия герметичных свинцово-кислотных аккумуляторных батарей SUNLIGHT SPb включает в себя модели установленной емкости от 33 до 200 Ач различных габаритов, с различными эксплуатационными характеристиками и различными типами терминалов и огнеупорных корпусов.

Срок службы аккумулятора Sunlight серии SPb – до 12 лет.

Аккумуляторные батареи SUNLIGHT (Салайт) серии SPb обладают низким внутренним сопротивлением и эффективными показателями разряда.

Благодаря этому батареи могут быть использованы во многих областях, как в циклическом режиме, так и в режиме подзарядки. Отсутствие необходимости в техническом обслуживании (необслуживаемые аккумуляторы) На протяжении всего эксплуатационного срока нет необходимости проверять уровень электролита или добавлять воду.

Газы, выделяющиеся при электролизе, полностью рекомбинируют (до 99%).

### Результаты исследований

При проведении экспериментов в натуральных условиях была получена зависимость изменения мощностных характеристик модуля PS-250 в зависимости от солнечной освещенности (рис.3):

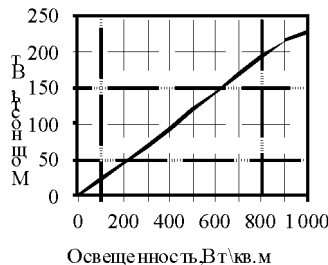


Рис. 3. Зависимость мощности модуля PS-250 от освещенности.

Как видно из графика на рис.3, изменение мощности имеет прямо пропорциональную зависимость с небольшим отклонением от прямой линии. Изменение зарядной емкости аккумулятора в зависимости от времени зарядки показано на рис. 4.

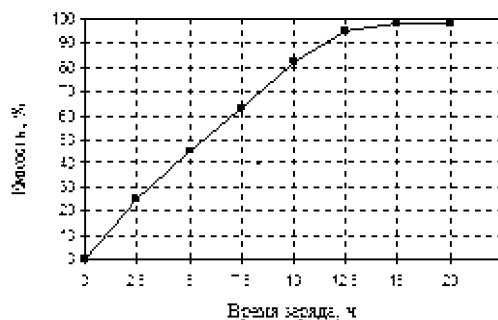


Рис. 4. Зависимость зарядной емкости аккумулятора от времени.

Изменение относительной емкости выражается как функция:  $c = f(t)$ , при постоянной освещенности  $E = 850 \text{ Вт/м}^2$ . Как видно из графика за 1 ч аккумулятор заряжается на 15 % номинальной ёмкости. Заряд аккумулятора происходит от 30 % до 98 % ёмкости. Время заряда до 98 % составляет 8-14 часов. Ток заряда соответствует ёмкости делённой на 10,6.

Большой ток на аккумулятор подавать нельзя, т.к. он выйдет из строя. Для данного типа ток составляет 6 А, рассчитаем время заряда аккумулятора:

$$t_{\text{заряд}} = \frac{c}{I_{\text{заряд}}} \cdot 1,2 = \frac{60}{6} \cdot 1,2 = 12 \text{ (часов)},$$

где  $c$  – ёмкость аккумулятора (А·ч),

$I_{\text{заряд}}$  – ток заряда (А).

При измерении потока солнечной радиации, можно определить зависимость тока заряда от солнечной освещенности:  $I = f(E)$  (рис. 5). Как видно из графика эта зависимость, является нелинейной.

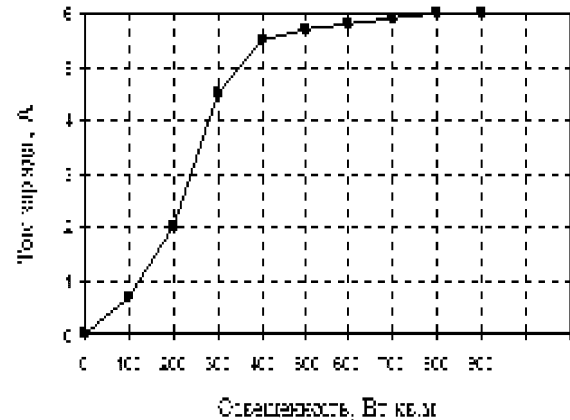


Рис. 5. Зависимость тока заряда от солнечной освещенности

Эти исследования очень значимы для дальнейших расчетов зарядки и работы аккумуляторной станции в комбинации с фотоэлектрическими модулями.

В результате проведения экспериментов было установлено, что при использовании в работе не 2-х, а 3-х аккумуляторов предложенного типа, соединенных параллельно, при зарядке от одного фотоэлектрического модуля, можно не устанавливать контроллер, т.к. зарядное напряжение, получаемое от модуля, не будет превышать допустимое.

### Выводы

На основе проведенных натурных испытаниях получены данные о наиболее эффективных режимах работы автономной установки, состоящей из 2-х серийных фотоэлектрических модулей PS 250, показано изменение мощностных характеристик и коэффициента преобразования модуля.

Проведенные испытания промышленных фотоэлектрических модулей RS-250 показали, что время заряда аккумулятора может изменяться на 30% и более.

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

При использовании предложенных установок для обеспечения тепловой и электрической

энергией автономных потребителей Крымского региона важны следующие моменты, а именно:

- использование солнечных установок с аккумуляторной станцией позволяет значительно сэкономить углеводородное топливо, транспортируемые на полуостров;
- используемая аккумуляторная станция, кроме использования в фотоэлектрической системе, может подзаряжаться об общей энергосети и служить источником бесперебойного питания, при возможных отключениях электрической энергии;
- при производстве таких станций для обеспечения автономных потребителей электрической энергией, значительно сокращаются сроки жилищного строительства. Т.к. индивидуальный потребитель может использовать для временного электроснабжения солнечную энергию и не зависеть от сроков исполнения работ, связанных с подведением электрических линий общей сети электропотребления.

### Список литературы

1. Кувшинов В.В. Перспективы развития солнечной энергетики в Крыму / В.В. Кувшинов// Сб. науч. работ СКУЭЭиП. – Севастополь: СКУЭЭиП, 2013. – Вып. 1 (45). – С. 182 - 189.
2. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей / В.В. Кувшинов, Какущина Е.Г., Чванова Д.А.// Энергетические установки и технологии / Севастополь: СевГУ. – 2016. – т. 2 - № 1. – С. 3-12.
3. Кувшинов В. В. Перспективы развития солнечной энергетики в Крыму / В. В. Кувшинов // Сборник научных трудов СКУЭЭиП. – 2013. – Вып. 1 (45). – С.182 - 189.
4. Андреев В. М. Фотоэлектрическое преобразование концентрированного солнечного излучения / Андреев В. М., Грилихес В. А., Румянцев В. Д. – Л: Наука, 1989. – 405 с.
5. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.
6. Колтун М. М. Оптика и метрология солнечных элементов / Колтун М. М. – М.: Наука, 1985. – 300 с.
7. Арбузов Ю. Д. Основы фотоэлектричества / Ю. Д. Арбузов, В. М. Евдокимов – М.: ГНУ ВИ-ЭСХ, 2007. – 292 с.
8. Кондратьев К. Я. Актинометрия / К. Я. Кондратьев – Л.: Гидрометеиздат, 1965. – 220 с.
9. Кувшинов В. В. Измерение прозрачности стёкол для солнечных установок / В. А. Сафонов, В. В. Кувшинов, А. С. Головин // Системы контроля окружающей среды: сб. науч. тр. – НАН Украины, МГИ: Севастополь. – 2006. –С. 73 -77.
10. Ж.И Алферов, В.М. Андреев Перспективы фотоэлектрического метода преобразования солнечной энергии. \ Под ред. Н.Н. Семенова. Черноголовка: Изд. ИХФ АН СССР, 1981.

### References

1. Kuvshinov V.V. Prospects for the development of solar energy in the Crimea / V.V. Pitchers // Sat. sci. works of SNSEE & IP. - Sevastopol: SNUAEiP, 2013. - Issue. 1 (45). - P. 182 - 189.
2. Use of a photovoltaic system to ensure uninterrupted operation of autonomous consumers. Kuvshinov, Kakushina EG, Chvanova DA // Power plants and technologies / Sevastopol: SevGU. - 2016. \_ t. 2 - No. 1. - P. 3-12.
3. Kuvshinov V.V. The prospects of development of solar energy in Crimea. *Sbornik nauchnykh trudov SNUNE &I*. Sevastopol, SNUNE&I, 2013, No. 1 (45). pp. 182 - 189.
4. Andreev. V.M. Photoelectric conversion concentrate Sancho radiation / Andreev V. M., Grill, V. A., Romans. D. – Leningrad: Nauka, 1989. – 405 S.
5. Rauschenbach G. Handbook for the design of solar panels / G. Rauschenbach. – M.: Energoatomizdat, 1983. – 397 p.
6. Koltun M. M. Optics and Metrology of solar cells / Koltun M. M. – M.: Nauka, 1985. – 300 p.
7. Arbuzov U.D. Basics of photovoltaics. Moscow, GNU VIES, Publ., 2007, 292 p.
8. Kondratyev K. Ya. Actinometry / K. Ya. Kondratyev – L.:Gidrometeoizdat, 1965. 220 p.
9. Kuvshinov V. V. the Measurement of the transparency of the glass for solar applications / V. A. Safonov, V. V. Kuvshinov, A. S. Golovin // System environment monitoring: collection of scientific works. Tr. – NAS of Ukraine, MHI Sevastopol. – 2006. –P. 73 -77.
10. J. I Alferov, V. M. Andreev Perspectives of the PV method of solar energy conversion. \ Ed.N. Semenov. Chernogolovka: Izd. IKHF AN SSSR, 1981.

УДК 532:62 – 133.6

## Плавниковый электродвигательный комплекс аксиально-радиальной конфигурации

Н.М. Шайтор<sup>1</sup>, А.В. Горпинченко<sup>2</sup>, Ю.И. Рясков<sup>3</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>Shaytor1950@mail.ru, <sup>2</sup>algornew@mail.ru, <sup>3</sup>rjaskoff@mail.ru

Статья поступила 17.11.2017 г.; после доработки 23.11.2017 г.

### Аннотация

Предложен способ получения аналогов бионических систем, исключающих применение промежуточных передач для имитации волнового движения активных плавниковых элементов, благодаря использованию электрических машин аксиально-радиальной конфигурации.

**Ключевые слова:** биомеханические системы, электрические машины, плавниковый электродвигательный комплекс, аксиально-радиальная структура.

## Fin electropulsion complex axial-radial configuration

N.M. Shaytor<sup>1</sup>, A.V. Gorpichenko<sup>2</sup>, Y.I. Rjaskoff  
Sevastopol, State University, 33 Vniversitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.  
<sup>1</sup>shaytor1950@mail.ru, <sup>2</sup>algornew@mail.ru, <sup>3</sup>rjaskoff@mail.ru

Received 17.11.2017 y.; received in final form 23.11.2017 y.

### Abstract

A method for producing analogues of bionic systems, excluding the application of the intermediate gear to simulate the wave motion of the fin elements, through the use of electric machines of axial-radial configuration.

**Key words:** biomechanical systems, electric machines, electro fin propulsion complex, axial-radial structure.

### Введение

В настоящее время в России и за рубежом исследуются возможности создания биомеханических систем, решающих проблему разработки более совершенных гидродинамических характеристик по сравнению с традиционными движителями и насосами. Анализ исследований показывает, что получение систем со сложным движением подвижной части связано с усложнением их конструкций [1]. Построение конструктивных схем, лишённых указанного недостатка, возможно путём применения электрических машин аксиально-радиальных конфигура-

ций [2, 4]. Нерешённой частью общей проблемы, которой посвящается статья, является получение преобразователей энергии, исключающих промежуточные передачи для имитации движения живых бионических существ. Задача исследования заключается в разработке плавниковых электродвигательных комплексов с применением электрических машин аксиально-радиальной конфигурации.

**Конструктивная схема плавникового движителя**

Генетический синтез биомеханической

структуры движителя (рис. 1 а), реализующей инверсное волновое движение эластичных плавниковых элементов, установленных вдоль наружной поверхности обтекаемой цилиндрической обечайки, внутри которой расположена синтезируемая структура, основан на анализе процесса формирования бегущей волны (рис. 1 б).

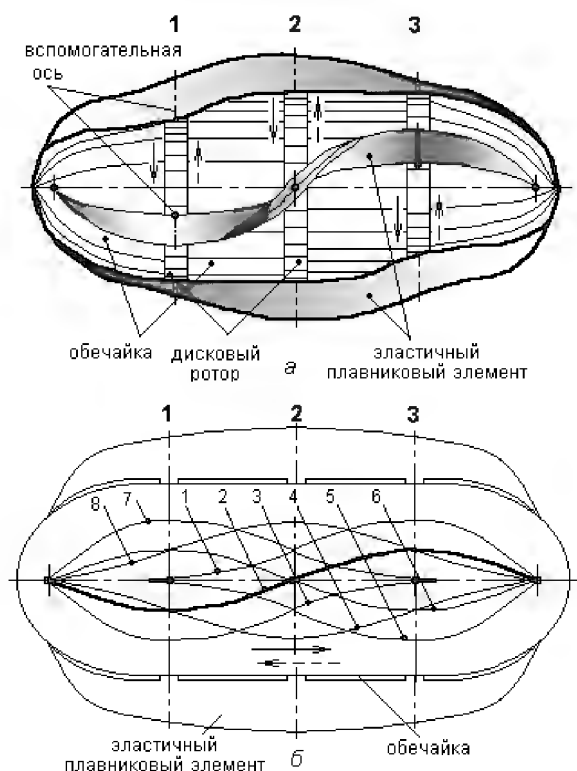


**Рис. 1.** Волновой плавниковый движитель:

а – общий вид; б – динамика плавникового элемента.

Функционирование исполнительного механизма состоит в деформации эластичных плавниковых элементов, осуществляемой по заданному алгоритму. Деформация достигается возвратно-поступательным вращением дисковых роторов 1, 2 и 3, установленных на главной оси обечайки при их аксиальном расположении. Усилие от дисковых роторов передаётся на вспомогательные оси, жёстко закреплённые на поверхностях указанных роторов, а от вспомогательных осей – к эластичным плавниковым элементам, установленным на упомянутых осях с возможностью вращения. Фазовое смещение гребня волны, бегущей вдоль главной оси, достигается относительным смещением дисковых роторов, находящихся в состоянии возвратно-поступательного вращения. Изменение движения бегущей волны на противоположное направление (инверсия волны) достигается инверсией дисковых роторов, на вспомогательных

осях которых установлены эластичные плавниковые элементы.

### Электромеханическая структура движителя

Построение аксиально-радиальной структурной композиции, достигается путем расположения электромагнитных модулей двигателя как в радиальном (АВС), так и в аксиальном направлении (1, 2, 3), как показано на рис. 2.

Динамику волны (рис. 1 б) плавникового движителя обеспечивают поворотом дисковых роторов 1, 2, 3 на соответствующий угол, который определяется разбиением структуры на аксиально-радиальные полюсообразующие фазные зоны А, В, С, (рис. 2).

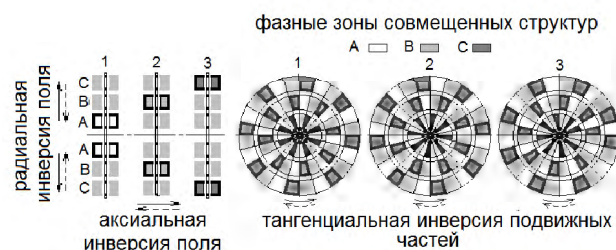


**Рис. 2.** Совмещённая аксиально-радиальная Структура.

Инверсное вращение подвижных частей в пределах каждой аксиальной структуры обеспечивают оператор электромагнитной инверсии, применяемым к фазным зонам А, В и С структуры и обеспечивающим аксиально-радиальную инверсию магнитного поля. Инверсия соответствующих электромагнитных величин структур (порядка чередования фаз АВС - СВА, тока, магнитного потока, направления волны поля фазных пространственно - концентрических обмоток) связана с относительным изменением их радиальной пространственной ориентации на противоположную ориентацию.

Для инверсии бегущей волны используют оператор электромагнитной инверсии, последовательно применяемый к совмещённым структурам (фазам) 1, 2 и 3, который обеспечивает аксиальную инверсию поля. Инверсия соответствующих электромагнитных величин фазных пространственно - концентрических обмоток совмещённых структур (порядка чередования фаз 123 – 321) связана с относительным изменением их аксиальной пространственной ориентации на противоположную ориентацию.

Совместное применение операторов инвер-

сии к фазным зонам А, В, С совмещённых структур 1, 2, 3 приводит к синтезу магнитного поля с аксиально-радиальным трёхмерным распределением, которое позволяет получить заданную траекторию пространственного движения плавниковых элементов движителя.

Инверсия электромагнитных величин фазных пространственно - концентрических обмоток результирующей структуры (порядка чередования фаз АВС-СВА, и дисковых роторов 123 – 321) связана с относительным изменением их аксиально-радиальной пространственной ориентации на противо-положную ориентацию, что приводит к реверсу.

### Оптимальная архитектура электрической машины движителя

Аксиально-радиальные полюсообразующие фазные зоны (рис. 2) создаются с помощью электрической машины - индукторного электро-механического преобразователя энергии.

Магнитная система такого преобразователя представляет собой концентрические электрические обмотки и элементарные электромагнитные модули - индукторы при их аксиально-радиальном расположении (рис. 3).

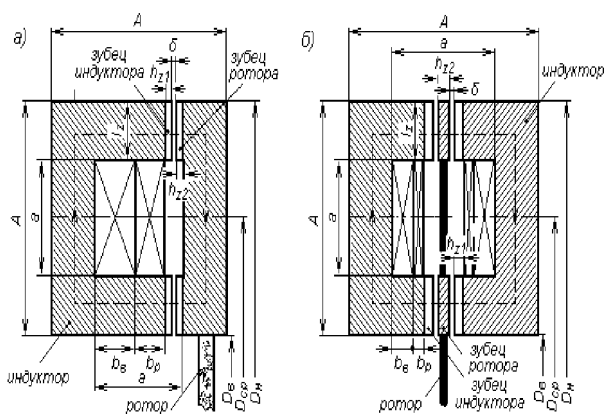


Рис.3. Магнитная система электро-механического преобразователя:

а – одноиндукторная; б – двухиндукторная.

В первой конструкции «один статор – один ротор» элементы индуктора расположены зубцами в сторону ротора (рис. 3 а). Внутри индуктора размещены две электрические обмотки, одна из которых является обмоткой возбуждения, а другая – рабочей обмоткой. Магнитный поток коммутируют с помощью магнитопровода с зубцами, вращающегося на диске ротора. К недостатку такой конструкции следует отнести большие массогабаритные

показатели и инерционные характеристики ротора, так как магнитопровод ротора для предотвращения насыщения должен быть выполнен одинакового сечения с индуктором. Полный магнитный поток вызывает большие электромагнитные осевые усилия, притягивающие ротор к статору. Это приводит к необходимости увеличивать воздушный зазор для предупреждения залипания ротора и устанавливать опорно-упорные подшипники. Кроме того, неизбежный эксцентриситет воздушного зазора способствует несимметрии магнитного потока, появлению знакопеременных осевых усилий, вибраций, шумов и повышенному износу узлов трения.

В другой конструкции «два статора – один ротор» между дисков статора расположен диск ротора, содержащий ферромагнитные зубцы – вставки (рис. 3 б). На каждом диске установлен индуктор, обращённый к ротору зубцами. К достоинствам данной конструкции, следует отнести отсутствие какой бы то ни было связи между толщиной зубцов ротора и их насыщением, что позволяет выполнить ротор в виде плоского диска с очень малым моментом инерции. Кроме того, значительно снижаются вредные усилия одностороннего притяжения ротора, поскольку они вызываются лишь несимметрией потоков рассеяния, а не полного магнитного потока.

При вращении ротора воздушный зазор относительно рассматриваемой точки, расположенной на поверхности зубцов индуктора, изменяется от наибольшего, когда над указанной точкой расположен зубец ротора, до наименьшего, когда над той же точкой окажется промежуток между зубцами ротора. Одновременно изменяются проводимость магнитного зазора и рабочий магнитный поток, который индуцирует ЭДС в рабочей обмотке. Полный период изменения ЭДС в рабочей обмотке индуктора происходит при повороте ротора на одно зубцовое деление, поэтому число пар зубцов  $z$  индуктора равно числу элементов индуктора на одном диске и равно числу пар зубцов ротора, причём

$$z = 60f / n,$$

где  $f$  – электрическая частота;  $n$  – частота вращения ротора, об/мин.

Частота вращения ротора и электрическая частота задаются техническими условиями на проектируемый движитель.

Задачу по определению главных размеров электрической машины решают следующим образом. Вначале находят оптимальное соотношение меди и стали индуктора, которое

влияет на магнитный поток, на величину номинальной ЭДС в рабочей обмотке, на мощность генератора и его стоимость. Затем определяют сечение меди обмотки возбуждения и рабочей обмотки, размер окна магнитопровода под медь и размеры каждой из обмоток и устанавливают радиальный и осевой размеры машины. В заключении определяют объём электромагнитного ядра и электрической машины в целом.

Для анализа влияния соотношения размеров меди и стали магнитопровода на магнитный поток рассмотрим магнитную систему одноиндукторной машины, показанную на рис.3 а. Сечения магнитопровода и меди выбирают квадратными со сторонами соответственно  $A$  и  $a$ . Так как квадрат имеет наименьший периметр, то расход стали и падение магнитного потенциала для такой конфигурации магнитопровода будут минимальными. Задаваясь условием постоянства габаритов магнитной системы ( $D_n = \text{const}$  и  $A = \text{const}$ ), решают задачу по определению соотношения  $a/A$ , при котором магнитный поток максимален.

Приведённый ниже анализ влияния соотношения размеров сечений обмотки возбуждения и магнитопровода на магнитный поток даётся [3] при следующих условиях и допущениях:

1. материал магнитопровода считают ненасыщенным, поскольку электрическая машина имеет увеличенный воздушный зазор и работает на прямолинейном участке кривой намагничивания;
2. считают, что плотность тока в обмотках не зависит от площади их сечения, то есть эффектом вытеснения тока пренебрегают;
3. полагают, что длина, площадь зубцов и воздушный зазор остаются неизменными, а соотношение  $a/A$  не влияет на отношение магнитной проводимости стали  $G$  и воздушного зазора  $G_\delta$ , то есть  $G/G_\delta = \text{const}$ .

Выражение для магнитного потока генератора с сосредоточенными обмотками с МДС  $F$  можно записать в виде:

$$\Phi = \frac{FG}{c+1} = \frac{\mu_0 \mu j z D_{cp} \alpha_z (A-a) a^2}{12(c+1)(A+a)},$$

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м - магнитная постоянная;  $\mu$  - относительная магнитная проницаемость стали индуктора;  $j$  - плотность тока в обмотке;  $D_{cp}$  - средний диаметр

магнитной системы;  $\alpha_z$  - зубцовое перекрытие;  $c = G/G_\delta$  - отношение магнитной проводимости стали к магнитной проводимости воздушного зазора.

Исследование функции  $\Phi(a)$  на экстремум при принятых условиях и допущениях даёт условие получения наибольшего магнитного потока при ненасыщенном магнитопроводе:

$$a = 0,61A. \quad (1)$$

При форме сечений обмотки и магнитопровода, отличающихся от квадратной, оптимальным соотношениям  $a/A$  должны удовлетворять размеры их параллельных сторон [3]. Полученные выводы справедливы и для двухиндукторных машин, рис. 3 б.

Оптимальное соотношение (1) находится в соответствии с данными для других электромеханических преобразователей с аналогичной конструкцией индуктора. Например, оптимальное соотношение размеров обмотки и магнитопровода индукторных муфт скольжения, полученное по условию максимума электромагнитного момента [3], находится в пределах  $a/A = 0,78 \div 0,37$ .

Сечение меди обмотки возбуждения определяют, исходя из МДС, потребной для проведения магнитного потока через воздушный зазор, а падение магнитного потенциала в стали учитывают введением поправочного коэффициента  $k_F$ . Тогда сечение меди обмотки возбуждения индуктора равно:

$$S_\sigma = k_F B_\delta \delta' / \mu_0 k_{zm} j, \quad (2)$$

где  $k_F = 1,25 \div 1,45$  - отношение МДС магнитной цепи к МДС зазора;

$B_\delta$  - индукция в зазоре;

$\delta' = 2N\delta$  - расчётное значение воздушного зазора;

$N$  - число индукторов;

$k_{zm} = 0,35 \div 0,65$  - коэффициент заполнения окна медью.

Плотность тока в зависимости от условий охлаждения машины в общем случае выбирается в пределах от 5 до 40 А/мм<sup>2</sup>.

При выборе значения индукции в зазоре  $B_\delta$  необходимо учитывать, что при расчёте магнитной цепи индукторных машин исходят не из индукции в воздушном зазоре, как обычно, а из допустимого значения индукции в зубцах индуктора  $B_{z1}$ . Это связано с тем, что насыщение зубцов индуктора снижает

модуляцию магнитного потока в зазоре а, следовательно, его использование. Величина  $B_{z1}$  с повышением частоты снижается, из-за вытеснения потока в стали и высоких удельных потерь. Для частот 400÷10000 Гц значения индукции в зубцах индуктора для стали 1521 (Э-44) можно принимать по табл. 1.

**Таблица 1.** Значения индукции в зубцах индуктора для стали 1521 (Э-44)

| $f, \text{Гц}$ | $B_{z1}, \text{Тл}$ |
|----------------|---------------------|
| 400            | 1,2-1,1             |
| 1000           | 1,1-1,0             |
| 1600           | 1,0-0,9             |
| 2400           | 0,9-0,8             |
| 6000           | 0,7-0,6             |
| 8000           | 0,6-0,5             |
| 10000          | 0,5-0,4             |

Магнитная индукция в воздушном зазоре связана с величиной  $B_{z1}$  соотношением

$$B_{\delta} = B_{z1} k_{3C} \alpha_z,$$

где  $k_{3C} = 0,81 \div 0,99$  - коэффициент заполнения сталью;

$\alpha_z = b_z / t_z = 0,35 \div 0,45$  - отношение ширины зубца к зубцовому делению (зубцовое перекрытие).

С учётом оптимального соотношения (1), поперечный размер ярма (радиальную длину зубца) получают в виде

$$l_z = 0,32a. \quad (3)$$

Сечение меди рабочей обмотки зависит как от расчётной мощности, так и от площади сечения воздушного зазора. При определении сечения воздушного зазора ориентируются на меньшее из сечений в зазорах, которое имеет место на внутреннем диаметре индуктора (что приводит к завышенному значению сечения меди рабочей обмотки).

Внутренний диаметр индуктора определяют, исходя из минимально допустимой ширины зубца (он может быть увеличен, исходя из конструктивных требований):

$$D_6 = \frac{zb_z}{\pi \alpha_z},$$

где  $b_z = b_{z \min} = (3 \div 5) \cdot 10^{-3}$  м - минимально допустимая ширина зубца.

Далее определяют сечение воздушного зазора на внутреннем диаметре под всеми зубцами индуктора

$$S_{\delta} = \pi l_z D_6 \alpha_z. \quad (4)$$

Сечение меди рабочей обмотки находят из выражения расчётной мощности  $P = EI_n$  генератора:

$$S_p = \frac{EI_n}{2,22 \pi k_{3M} j f S_{\delta} B_{\delta}}, \quad (5)$$

где  $E = (1,15 \div 1,3) U_n$  - противо - ЭДС рабочей обмотки;  $I_n$  - номинальный ток рабочей обмотки машины.

Сечение окна под медь обеих обмоток со стороны  $a$ ,  $a^2 = S_p + S_6$ , с учётом выражений (1-5) можно записать в виде

$$a^2 = c_1 / a + S_6,$$

где  $c_1 = EI_n / 0,71 \pi^2 k_{3M} j f B_{\delta} D_6 \alpha_z$  - постоянная.

Получают кубическое уравнение

$$a^3 - a S_6 - c_1 = 0.$$

Принимая обозначения  $p = -S_6$  и

$q = -c_1$ , переходим к кубическому уравнению, приведённому к «неполному» виду

$$a^3 + p + q = 0.$$

Для этого уравнения существует решение Кардано, причём физический смысл в данной задаче имеет только действительный корень

$$a = A + B,$$

где  $A = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{Q}}$ ;

$$B = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{Q}};$$

$$Q = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2.$$

В частности, в случае  $Q > 0$ , решение Кардано даёт

$$a = \sqrt[3]{\frac{c_1}{2} + \sqrt{\left(\frac{-S_6}{3}\right)^3 + \left(\frac{c_1}{2}\right)^2}} + \sqrt[3]{\frac{c_1}{2} - \sqrt{\left(\frac{-S_6}{3}\right)^3 + \left(\frac{c_1}{2}\right)^2}}$$

Окончательно имеем выражение размеров окна индуктора под медь обмоток в функции заданных при проектировании величин:

$$a = \sqrt[3]{\frac{0,705P}{\pi j k_3 f z b_{z1} B_{\delta}}} + \sqrt[3]{\frac{0,497P^2}{(\pi j k_3 f z b_{z1} B_{\delta})^2} - \left(\frac{k_F \delta' B_{\delta}}{3 \mu_0 j k_3}\right)^3} +$$

$$+ \sqrt[3]{\frac{0,705P}{\pi j k_3 f z b_{z1} B_\delta}} - \sqrt{\frac{0,497P^2}{(\pi j k_3 f z b_{z1} B_\delta)^2} - \left(\frac{k_F \delta B_\delta}{3 \mu_0 j k_3}\right)^3}.$$

Если  $Q < 0$  («неприводимый» случай, который имеет место только для микромашин), необходимо прибегнуть к тригонометрическому решению кубического уравнения:

$$a = 2 \sqrt{-\frac{p}{3} \cos \frac{\alpha}{3}},$$

где  $\cos \alpha = -\frac{q}{2 \sqrt{-(p/3)^3}}$ , которое даёт

решение в виде

$$a = 2 \sqrt{\frac{k_F \delta B_\delta}{3 \mu_0 j k_3} \cos \left[ \frac{1}{3} \arccos \frac{2,021 P \mu_0^3 (j k_3)^2}{f z b_{z1} B_\delta (k_F \delta B_\delta)^3} \right]}$$

Поскольку обе обмотки имеют одну одинаковую сторону, равную  $a$ , то две другие стороны обмотки возбуждения и рабочей обмотки соответственно равны

$$b_e = S_e / Na; \quad b_p = S_p / Na.$$

Окончательно главные размеры машины определяются наружным диаметром

$$D_n = D_e + 2A$$

и осевым размером машины

$$l = N(h_{z1} + \delta) + a + h_{z2},$$

где  $N$  - число статорных дисков;

$h_{z1}$  - высота зубца индуктора;

$h_{z2}$  - высота зубца ротора.

Высота зубца индуктора выбирается из условия не менее половины ширины паза  $h_{z1} \geq b_{n1} / 2$  или не менее 20-ти кратной величины воздушного зазора  $h_{z1} \geq 20\delta$ , или  $h_{z1} = (30 \div 40)\delta$ . Минимальное значение высоты зубцов ротора не ограничено насыщением и определяется только механической прочностью ротора и его окружной скоростью, а максимальное – его инерционностью и может быть принято  $h_{z2} = (12 \div 15)\delta$ .

Величину воздушного зазора выбирают минимально возможной из технологических условий, поскольку увеличение зазора приводит к росту расхода меди, потерь на возбуждение и росту габаритов электромагнитного ядра.

Опыт изготовления одноиндукторных электромеханических преобразователей показывает, что для предупреждения залипания воздушные зазоры должны выбираться в функции диаметра ротора, как указано в таблице 2.

Таблица 2. Воздушные зазоры.

| $D_n$ , м | $\delta$ , мм |
|-----------|---------------|
| 0,3-0,4   | 0,7           |
| 0,5-0,6   | 0,9           |
| 0,7-0,8   | 1,1           |
| 0,9-1,0   | 1,4           |
| 1,1-1,2   | 1,7           |
| 1,3-1,5   | 2             |

В двухиндукторных конструкциях усилия бокового магнитного притяжения значительно снижены, поэтому зазор может быть уменьшен на 15-20 % и более в сравнении со значениями, приведёнными в таблице 2.

В заключение определяют объём электромагнитного ядра  $V_{эя}$  и электрической машины в целом. Объём электромагнитного ядра составляют медь обмоток и сталь, состоящая из индукторов и зубцов, поэтому

$$V_{эя} = V_m + V_{cu} + V_{cz} + V_{cp},$$

где  $V_m = \pi D_{cp} a^2$  - объём меди обмоток;

$V_{cu} = N 3 z b_u l_z a$  - объём стали индуктора;

$V_{cz} = N 2 z h_{z1} b_{z1} l_z$  - объём стали зубцов индуктора;  $V_{cp} = 2 z h_{z2} b_{z2} l_z$  - объём стали зубцов ротора.

Здесь берут средние значения ширины индуктора  $b_u$ , ширины зубцов индуктора  $b_{z1}$  и ротора  $b_{z2}$ , которые имеют место в районе среднего диаметра индуктора

$$D_{cp} = 0,5(D_e + D_n).$$

Полный объём электрической машины

$$V = 0,25 \pi D_n^2 l.$$

Таким образом, установлены соотношения между механическими, электрическими и электромагнитными величинами индукторных машин. Поскольку при расчёте машины номинальное напряжение, ток, частота тока и частота вращения считаются заданными, а величина зазора, индукция в зазоре и плотность тока могут быть выбраны с учётом рекомендаций по проектированию, то приведенные соотношения однозначно

определяют главные размеры машины. Это позволяет решить проблему выбора оптимальных размеров индукторной электрической машины аксиально-радиальной конфигурации для волнового плавникового двигателя.

### Заключение

С помощью использования электрических машин аксиально-радиальной конфигурации можно получить аналоги бионических систем, исключающих применение промежуточных передач для имитации волнового движения активных плавниковых элементов.

Получены оптимальные соотношения размеров элементарных электромагнитных модулей, на основе которых создаётся архитектура индукторной электрической машины аксиально-радиальной конфигурации для волнового плавникового двигателя.

Дальнейшим направлением исследований является разработка математической модели плавникового электродвигательного комплекса аксиально-радиальной конфигурации.

### Список литературы

1. Коржев В.К., Чубаров С.Н., Белякова Е.Н. Гидродинамика экологически чистого гидродвигателя, основанного на бионических принципах // Морські біотехнічні системи. - Вип.2. Севастополь: НДЦ ЗСУ "Державний океанаріум". - 2002. С. 77 - 80.
2. Шайтор Н.М., Рясков Ю.И. Структурный синтез магнитно- коммутируемых электромеханических преобразователей. // Сборник Фундаментальные и прикладные науки сегодня. Материалы XII международной научно практической конференции. н.-и. ц. «Академический» - 2017. - С. 79 - 83.
3. Шайтор Н.М. Проблемы и перспективы разработки электромеханических преобразователей новых конфигураций // Техническая электродинамика. - 2004. - №.1. - С. 55-59.
4. Шайтор Н.М., Рясков Ю.И. Индукторные электрические машины повышенной энергетической эффективности. // Сборник Проблемы повышения эффективности электромеханических преобразователей в электроэнергетических системах. Фундаментальные и прикладные науки сегодня. Материалы международной научно-технической конференции. - 2015. - С. 59 - 61.
5. lic motor based on bionic principles // Marine biotechnical system. Edition. 2. Sevastopol: SRC Armed forces of Ukraine "State Oceanarium". - 2002. P. 77 - 80.
6. Shaytor N. M., Ryaskov Y. I. Structural synthesis magnetoconductivity Electromechanical transducers. // Collection of Fundamental and applied Sciences today. Materials of XII international scientific-practical conference. SRC "Academic"-2017. - P. 79 - 83.
7. Shaytor N. M. Problems and prospects of development of Electromechanical converters of new configurations // Technical electrodynamics. - 2004. - №.1. - P. 55-59.
8. Shaytor N. M., Ryaskov Y. I. Induction electrical machines of high energy efficiency. // Collection of Problems increase efficiency of Electromechanical converters in power systems Fundamental and applied Sciences today. Materials of international scientific-technical conference. - 2015. - P. 59 - 61.

### References

1. Korzhev V. K., Chubarov S. N., Belyakova E. N. Hydrodynamics of environmentally friendly hydrau-

---

## ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

---

УДК 663.1

### Микробиологическое выщелачивание молибденсодержащих отходов

В.М. Гавриш<sup>1</sup>, Ю.О. Шагова<sup>2</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, 5brachman5@gmail.com<sup>1</sup>, shagova\_94@mail.ru<sup>2</sup>

Статья поступила 08.11.2017 г.; после доработки 10.11.2017 г.

---

#### Аннотация

Статья посвящена разработке технологической схемы процесса микробиологического выщелачивания молибденсодержащих отходов. Полученные данные по разработке технологии показывают высокую эффективность переработки молибденсодержащих отходов. Работа выполнялась в рамках фонда умник. Контракт № 8241ГУ/2015.

**Ключевые слова:** молибденовая синь, молибденсодержащие сплавы, микробиологическое выщелачивание, бактерии.

---

### Microbiological leaching of molybdenum-containing waste

V.M. Gavrish<sup>1</sup>, J.O. Shagova<sup>2</sup>

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, 5brachman5@gmail.com<sup>1</sup>, shagova\_94@mail.ru<sup>2</sup>

Received 08.11.2017 y.; received in final form 10.11.2017 y.

---

#### Abstract

The article is devoted to the development of structural and technological scheme of the process of microbial leaching of molybdenum-containing waste. This technology will allow not only to molybdenum but molybdenum and dispose of waste. .

**Key words:** molybdenum blue, molybdenum alloys, microbiological leaching, bacteria.

---

#### Введение

Современные технологии переработки молибденовых руд являются затратными и характеризуются большим процентом потерь молибдена до 30 - 40 % [1]. Тем самым отработанные изделия, содержащие молибден, не проходят рецикл металла ввиду высокой стоимости перера-

ботки, что приводит к значительному скоплению молибденсодержащих отходов. Поэтому перед современной химической промышленностью возникает задача разработки методов переработки отходов, содержащих молибден, которая послужит не только источником дополнительного молибдена, но и даст возможность утилизиро-

вать отработанные молибденсодержащие изделия.

Ранее, в проведенных работах [2], научно-образовательного центра Перспективные технологии и материалы СевГУ была предложена технология переработки молибденсодержащих отходов микробиологическим способом, которая основана на использовании жизнедеятельности ассоциации мезофильных бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* и ферроплазмидов. Преимущества предлагаемой технологии по сравнению с существующими формируется следующими факторами: минимальным технологическим оборудованием, высоким выходом молибдена, практическим отсутствием потерь молибдена при переработке, относительно малыми эксплуатационными расходами и обеспечением экологической безопасности, так как участие микроорганизмов происходит в естественном цикле круговорота веществ, не оказывая отрицательного влияния на экосистему и не вызывая появления новых загрязняющих агентов [3].

#### Цели и задачи исследования:

Целью работы является оценка возможности создания технологии микробиологического выщелачивания молибденсодержащих отходов.

Задачи: разработка операционная схема переработки молибденсодержащих отходов микробиологическим выщелачиванием; технологическая схема переработки молибденсодержащих отходов микробиологическим выщелачиванием.

Ранее, в проведенных работах [2], научно-образовательного центра Перспективные технологии и материалы СевГУ была предложена технология переработки молибденсодержащих отходов микробиологическим способом, которая основана на использовании жизнедеятельности ассоциации мезофильных бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* и ферроплазмидов. Преимущества предлагаемой технологии по сравнению с существующими формируется следующими факторами: минимальным технологическим оборудованием, высоким выходом молибдена, практическим отсутствием потерь молибдена при переработке, относительно малыми эксплуатационными расходами и обеспечением экологической безопасности, так как участие микроорганизмов происходит в естественном цикле круговорота веществ, не оказывая отрицательного влияния на экосистему и не вызывая появления новых загрязняющих агентов [3].

В дополнении к предыдущей работе была разработана операционная схема процесса переработки молибденсодержащих отходов (рис. 1).



Рис. 1. Операционная схема переработки молибденсодержащих отходов микробиологическим выщелачиванием.

На основании операционной схемы, была разработана технологическая схема процесса микробиологического выщелачивания

молибденсодержащих отходов, которая представлена на рис. 2.

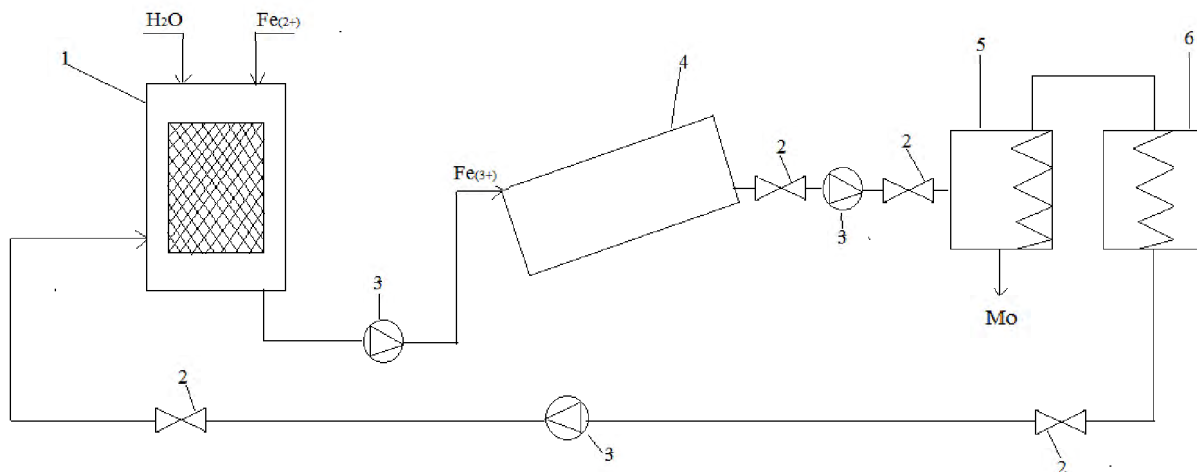


**Рис. 2.** Технологическая схема переработки молибденсодержащих отходов микробиологическим:

1 – биореактор с активированным углем марки БАУ-А, оборудован и термостатом и подогревателем. Объем биореактора равен 1 м<sup>3</sup>; 2 – запорная арматура; 3 – насос, производительностью до 50 л/ч; 4 – галтовочный барабан (реактор для выщелачивания молибдена) представляет собой емкость из нержавеющей стали, объем которого равен 200 литров, скорость вращения 24 об/мин; 5 – выпарной аппарат, производительностью 50 л/ч, с функцией очистки выпаренного вещества; 6 – конденсатор для возвращения воды в цикл.

Так согласно предлагаемой схемы. Переработка молибденсодержащих отходов осуществляется в несколько этапов.

Этап 1. Подготовка активированного угля марки БАУ-А осуществляется с целью накопления культуры микроорганизмов на иммобилизаторе, его предварительно замачивают в растворе, содержащем специально адаптированную ассоциацию бактерий в течение одних суток. Далее уголь загружают в установку, представляющую собой, колоночный биореактор 1, оборудованный термостатом и подогревателем.

Через колонну с иммобилизатором пропускают раствор двухвалентного железа. В ходе всего процесса раствор непрерывно перемешивается и поддерживает оптимальную температуру  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ .

Смену раствора производят каждые 5 дней. Во время осуществления процесса поддерживают кислотность среды (рН) 1,5 – 2,0. Об активности бактерий судят по динамике окисления железа ( $C_{\text{Fe}^{3+}}/C_{\text{Fe}^{2+}}$ )

Этап 2. Полученный биораствор из биореактора применяют в качестве окисляющей среды для микробиологического выщелачивания молибдена из молибденсодержащих отходов. Отходы, содержащие молибден помещают в реактор 2 (галтовочный барабан) с непрерыв-

ным механическим перемешиванием, скорость вращения реактора составляла 24 оборота в минуту. Температура в реакторе, на протяжении всего опыта, поддерживалась  $22 - 25^\circ\text{C}$ , куда добавляется полученный ранее биораствор, содержащий ассоциации бактерий *Thiobacillus ferrooxidans* и ферроплазموидов. После чего включают реактор.

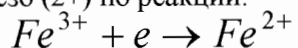
Этап 3. Ежедневно отбирается проба из реактора для измерения рН раствора, который поддерживают в пределах 1,5 - 2,5, а также масса загруженных фрагментов. В случае отклонения рН от заданных значений производится регулирование рН раствора, путем добавления серной кислоты до установления необходимого рН. После 2х кратного регулирования рН - раствор отправляют на выпаривание в выпарной аппарат 5.

В реактор добавляют новую порцию раствора объемом 1 литр, содержащего ассоциацию мезофильных микроорганизмов типа *Thiobacillus ferrooxidans* и ферроплазموидов, с концентрацией трехвалентного железа от 10,0 г/л.

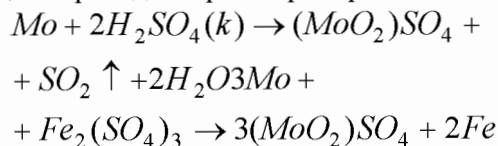
Если на следующие сутки после замены раствора не происходило изменение массы, процесс останавливают.

Причиной прекращения растворения молибденсодержащего сплава (изменение массы

металла), является восстановления железа (3+) в железо (2+) по реакции:



В результате процесса молибден извлекается из сплава в раствор в виде солей молибдена (молибденовые сини) с примесями железа. Молибден переходит в раствор по реакциям:



Вода, образующаяся в результате работы выпарного аппарата 5, возвращается обратно в цикл, с помощью конденсатора 6.

В результате проведенных исследований, по разработанной технологической схеме, сплавов, содержащие молибден, с различным химическим составом: МВ-50 (содержание молибдена до 50 %), МД-40 (содержание молибдена до 60%) и молибденовых тиглей (содержание молибдена 99,9%) была получена молибденовая синь следующего элементного состава (табл. 1, 2, 3)

**Таблица 1.** Элементный состав полученного вещества, сплав марки МВ-50.

| Твердая фаза  |         |                 | Выпаренный осадок |         |                 |
|---------------|---------|-----------------|-------------------|---------|-----------------|
| Атомный номер | Элемент | Концентрация, % | Атомный номер     | Элемент | Концентрация, % |
| 42            | Mo      | 1,251           | 42                | Mo      | 64,845          |
| 20            | Ca      | 0,045           | 20                | Ca      | 0,162           |
| 74            | W       | 95,772          | 26                | Fe      | 34,792          |
| 26            | Fe      | 2,684           | 28                | Ni      | 0,090           |
| 28            | Ni      | 0,060           | 12                | Mg      | 0,111           |
| 14            | Si      | 0,186           |                   |         |                 |
| 12            | Mg      | 0,002           |                   |         |                 |

**Таблица 2.** Элементный состав полученного вещества, сплав марки МД-40.

| Атомный номер | Элемент | Концентрация, % |
|---------------|---------|-----------------|
| 30            | Zn      | 0,047           |
| 28            | Ni      | 0,126           |
| 16            | S       | 1,856           |
| 26            | Fe      | 18,467          |
| 29            | Cu      | 49,364          |
| 42            | Mo      | 30,14           |

**Таблица 3.** Элементный состав полученного вещества, сплав Мо 99,99%

| Атомный номер | Элемент | Концентрация, % |
|---------------|---------|-----------------|
| 30            | Zn      | 0,047           |
| 28            | Ni      | 0,126           |
| 16            | S       | 1,856           |
| 26            | Fe      | 24,467          |
| 42            | Mo      | 73,501          |

### Заключение

По данным таблиц представленных выше можно с точностью утверждать, что переработка молибденсодержащих отходов согласно данной технологии даст возможность повысить выход молибдена из отработанных молибденсодержащих сплавов, а также утилизировать отходы промышленности, содержащие молибден.

Производительность данного метода в разы больше аналогов, а также не требует строительства установок по поглощению паров органиче-

ских растворителей и герметизации установок, также метод является технологически проще

### Список литературы

1. Ахметов Н.С. Общая и неорганическая химия // М.: Высшая школа, 2001. – с. 4
2. Гавриш, В.М. Рециклинг молибденсодержащих отходов / В.М. Гавриш, Г.А. Баранов, Ю.О. Ю.О. Шагова// Экология и развитие общества: научн. журнал - 2016. №2(17). - с. 30
3. Чайка Т.В. Оптимизация наработки биорастворов для микробиологической переработки твер-

до-сплавных отходов / Т.В. Чайка, Н.М. Дербасова, В.М. Гавриш, Г.А. Баранов // Сб. наук. тр. СКУЯЭиП. – Севастополь: изд-во СКУЯЭиП, 2014. – Вып. 1 (49). – С.106 – 113.

## References

1. Akhmetov N. With. General and inorganic chemistry // M.: Higher school, 2001. – p. 4
2. Gavrish, V. M. Recycling molybdenite containing waste / V. M. Gavrish, A. Bar-new, Y. O. Y. O. Shahova// Ecology and development: science. journal - 2016. №2(17). - p. 30
3. Chaika T. V. Optimization developments biosolutions for microbiological processing of hardfloatable waste / T. V. Chaika, N. M. Girbasova, V. M. Gavrish, A. Baranov // SB. Sciences. Tr. Snunei. – Sevastopol: publishing house of Sunei. 2014. – Vol. 1 (49). – P. 106 – 113*ekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [Safety and issues of the WWER nuclear installation operation engineer assistance]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2013, 304 p.
4. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Semenov A.A., Chernov E.V., Bogachek. *Fizicheskie i konstruksionnye osobennosti yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [WWER nuclear installations physical and specific design features]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2011, 376 p.
5. Braslavskiy Yu.V., Matuzaev K.B., Trigub M.A. Research of the Reactor Core Construction and Condition Impact on the Recriticality Attainment. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii* [Energy installations and technologies]. Sevastopol', FAEI HE STU Publ., 2016, Vol. 2, No 3, pp.5-10.

УДК 539.166.3

## Способ оперативного определения обогащения урана по интенсивности испускания мгновенных гамма – квантов спонтанного деления

П.А. Пономаренко<sup>1</sup>, М.А. Фролова<sup>2</sup>, Е. П. Таборовская<sup>3</sup><sup>123</sup> ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, 299016, РФ, frolova-85@mail.ru

Статья поступила 20.11.2017 г.; после доработки 22.11.2017 г.

### Аннотация

Способ измерения обогащения в образце урана или его соединениях, заключается в измерении скорости генерации в образце гамма-квантов высоких энергий и отличается тем, что измеряется скорость мгновенных гамма квантов с энергией не менее 4 МэВ, рождающихся только при спонтанном делении ядер урана-235 и урана-238.

Ключевые слова: гамма кванты, энергии, уран.

## The method of prompt determination of uranium enrichment intensity of the emission of instant gamma unprompted fission

P.A. Ponomarenko<sup>1</sup>, M.A. Frolova<sup>2</sup>, E.P. Taborovskaya<sup>3</sup><sup>123</sup> FSAEA Sevastopol state university, 33 University street., Sevastopol, 299053, Russia, , frolova-85@mail.ru

Received 20.11.2017 y.; received in final form 22.11.2017 y.

### Abstract

The method of measuring the enrichment in a uranium sample or its compounds is to measure the rate of generation in a sample of high-energy gamma quanta and is characterized by the fact that the speed of instant gamma rays with an energy of at least 4 MeV, which are produced only when spontaneous fission of uranium-235 and uranium-238.

Keywords: gamma, energy, uranium.

### Введение

В настоящее время атомные электростанции работают в 31 стране. В этих странах эксплуатируются 442 блока и суммарно вырабатывают  $3,82 \cdot 10^5$  МВт, что составляет около 20% электроэнергии, вырабатываемой в мире.

В ряде стран 40 и более процентов электроэнергии производится на атомных электростанциях: Франция (78,2%), Бельгия (60,1%), Украина (47%), Швеция (46,2%), Болгария (45,4%), Словения (44%) и др.

Почти на всех типах атомных электростанций используются следующие типы реакторов: ВВЭР-440, ВВЭР-1000, ВВЭР-1200, РБМК-1000,

PWR, BWR и CANDU. Реактор CANDU разработан в Канаде, замедлителем у него служит тяжелая вода, ядерное топливо – природный уран. В настоящее время такие реакторы работают в Канаде, Южной Корее, Аргентине, Индии и два блока электрической мощностью по 700 МВт каждый заказаны Румынией.

Все остальные блоки, а так же блоки на быстрых нейтронах (типа БН и др), используют в качестве ядерного топлива обогащенный уран.

### Постановка цели и задач научного исследования

Возможность определения обогащения ура-

на ураном  $^{235}\text{U}$  по испускаемым мгновенным гамма квантам в области энергий гамма – квантов  $4\div 7$  МэВ при спонтанном делении ядер урана.

### Существующие способы обогащения урана

Существует несколько способов обогащения урана, основными из которых являются диффузионный и центрифужный.

Страны, занимающиеся обогащением урана, занимаются и разработкой способов измерения обогащения урана ураном-235.

Атомные электростанции работают на уране, который, как и любой другой металл, необходимо извлечь из недр Земли. Урановые руды добываются карьерным или шахтным способом, а также методом подземного выщелачивания.

Урана на Земле не так уж мало - по распространенности он на 38-м месте. А больше всего этого элемента в осадочных породах - углистых сланцах и фосфоритах: до  $8\cdot 10^{-3}$  и  $2,5\cdot 10^{-2}\%$  соответственно. Всего в земной коре содержится  $10^{14}$  тонн урана, но главная проблема в том, что он весьма рассеян и не образует мощных месторождений.

Промышленное значение имеют примерно 15 минералов урана. Это урановая смолка - ее основой служит оксид четырехвалентного урана, урановая слюдка - различные силикаты, фосфаты и более сложные соединения с ванадием или титаном на основе шестивалентного урана [2].

Уран - слаборадиоактивный элемент, он не имеет стабильных изотопов. Самыми распространенными изотопами урана являются уран-238 (имеет 146 нейтронов, в природном уране составляет 99,3 %) и уран-235 (143 нейтрона, природная распространённость 0,7 %).

Обогащение урана в настоящее время определяется по испускаемым гамма квантам урана  $^{235}_{92}\text{U}$ , сопровождающим альфа-распад ядер согласно закону радиоактивного распада.

В связи с низкой энергией указанных гамма-квантов ( $\approx 50$  кэВ) обогащение определяют и по излучению дочерних нуклидов уранового и актиноуранового рядов.

### Рассматриваемый метод определения обогащения урановой руды

Суть рассматриваемого метода определения обогащения урановой руды состоит в возможности определения обогащения урана ураном  $^{235}\text{U}$

по испускаемым мгновенным гамма квантам в области энергий гамма – квантов  $4\div 7$  МэВ при спонтанном делении ядер урана.

Настоящая статья посвящена рассмотрению одного из способов измерения урана, который подкреплён патентом Российской Федерации [1].

Согласно [3] мгновенные гамма кванты можно классифицировать по энергетическим группам от 1 до 7 МэВ. Однако в связи с тем, что энергии запаздывающего гамма излучения лежат в диапазоне  $1\div 3$  МэВ происходит накладка энергий мгновенных и запаздывающих гамма-квантов в области  $1\div 3$  МэВ. Это не позволяет определить их происхождение по энергии, а, следовательно, невозможно их количество связать с числом ядер  $^{238}_{92}\text{U}$  и  $^{235}_{92}\text{U}$  в  $1\text{ c}^3$ .

Число гамма квантов с энергией  $4\div 7$  МэВ, которые генерируются только спонтанным делением ядер урана, в связи с различными полупериодами спонтанного деления, возможно соотнести с числом ядер  $^{238}_{92}\text{U}$  и  $^{235}_{92}\text{U}$  по их количеству за единицу времени по отношению к природному урану.

Так, учитывая период спонтанного деления урана  $^{235}$  и  $^{238}$  и количества ядер природного урана в единице массы – 1г, можно определить число делений в единицу времени по формуле:

$$\frac{dN}{dt} \left( \frac{\text{ядер}}{\text{с}} \right) = \lambda (\text{с}^{-1}) \cdot N (\text{ядер}),$$

где:  $\lambda$  - постоянная распада;

$N$  - число ядер урана в единице массы;

$\frac{dN}{dt}$  - скорость распада ядер,

которое для урана-235 составит  $2,3926\cdot 10^{-4} \frac{\text{ядер}}{\text{с}}$ , а для урана-238 –  $6,9494\cdot 10^{-3} \frac{\text{ядер}}{\text{с}}$ .

В диапазоне энергий  $4\div 6,5$  МэВ суммарное число гамма-квантов, приходящихся на одно деление составляет  $0,136 \frac{\gamma - \text{квант}}{\text{с}}$  [3, стр.225].

Тогда число испускаемых гама-квантов в единицу времени урана-235 и 238 составит  $3,9793\cdot 10^{-5} \frac{\gamma - \text{квант}}{\text{с}}$  и  $9,4512\cdot 10^{-4} \frac{\gamma - \text{квант}}{\text{с}}$  соответственно.

Были произведены расчеты числа испускаемых гамма-квантов в единицу времени в зависимости от обогащения (таблица 1).

Согласно полученным данным была аппроксимирована зависимость выхода гамма-квантов на деление в единицу времени  $\gamma/\text{с}$  от обогащения:

$$y = 2 \cdot 10^{-8} \cdot x^4 - 9 \cdot 10^{-7} \cdot x^3 + 10^{-5} \cdot x^2 - 6 \cdot 10^{-5} \cdot x + 0,001 \quad (1)$$

Если полученную зависимость (1) ввести в анализатор, который регистрирует скорость мгновенных гамма-квантов в диапазоне  $4 \div 7$  МэВ, то

устройство будет выдавать данные по обогащению природного урана.

Графическая зависимость представлена на рисунке 1.

**Таблица 1.** Число испускаемых гамма-квантов в единицу времени в зависимости от обогащения.

| обогащение, % | выход гамма-квантов $^{238}_{92}\text{U}$ в энергетическом диапазоне $4 \div 6,5$ МэВ на деление, $\frac{\gamma - \text{квант}}{c}$ | выход гамма-квантов $^{235}_{92}\text{U}$ в энергетическом диапазоне $4 \div 6,5$ МэВ на деление, $\frac{\gamma - \text{квант}}{c}$ | Суммарный выход гамма квантов |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| 0             | только мгновенные $\frac{dN_{\text{мгн}\gamma\text{-квантов}}}{dt} = 9,45\text{E-}04$                                               |                                                                                                                                     |                               |
| 0,007         | 9,38497E-04                                                                                                                         | 2,78559E-07                                                                                                                         | 9,38776E-04                   |
| 0,01          | 9,35662E-04                                                                                                                         | 3,97942E-07                                                                                                                         | 9,36060E-04                   |
| 0,015         | 9,30936E-04                                                                                                                         | 5,96913E-07                                                                                                                         | 9,31533E-04                   |
| 0,02          | 9,26211E-04                                                                                                                         | 7,95884E-07                                                                                                                         | 9,27007E-04                   |
| 0,025         | 9,21485E-04                                                                                                                         | 9,94855E-07                                                                                                                         | 9,22480E-04                   |
| 0,03          | 9,16760E-04                                                                                                                         | 1,19383E-06                                                                                                                         | 9,17953E-04                   |
| 0,035         | 9,12034E-04                                                                                                                         | 1,3928E-06                                                                                                                          | 9,13427E-04                   |
| 0,04          | 9,07308E-04                                                                                                                         | 1,59177E-06                                                                                                                         | 9,08900E-04                   |
| 0,045         | 9,02583E-04                                                                                                                         | 1,79074E-06                                                                                                                         | 9,04374E-04                   |
| 0,05          | 8,97857E-04                                                                                                                         | 1,98971E-06                                                                                                                         | 8,99847E-04                   |
| 0,075         | 8,74230E-04                                                                                                                         | 2,98457E-06                                                                                                                         | 8,77214E-04                   |
| 0,1           | 8,50602E-04                                                                                                                         | 3,97942E-06                                                                                                                         | 8,54581E-04                   |
| 0,2           | 7,56090E-04                                                                                                                         | 7,95884E-06                                                                                                                         | 7,64049E-04                   |
| 0,3           | 6,61579E-04                                                                                                                         | 1,19383E-05                                                                                                                         | 6,73517E-04                   |
| 0,4           | 5,67068E-04                                                                                                                         | 1,59177E-05                                                                                                                         | 5,82985E-04                   |
| 0,5           | 4,72557E-04                                                                                                                         | 1,98971E-05                                                                                                                         | 4,92454E-04                   |
| 0,6           | 3,78045E-04                                                                                                                         | 2,38765E-05                                                                                                                         | 4,01922E-04                   |
| 0,7           | 2,83534E-04                                                                                                                         | 2,78559E-05                                                                                                                         | 3,11390E-04                   |

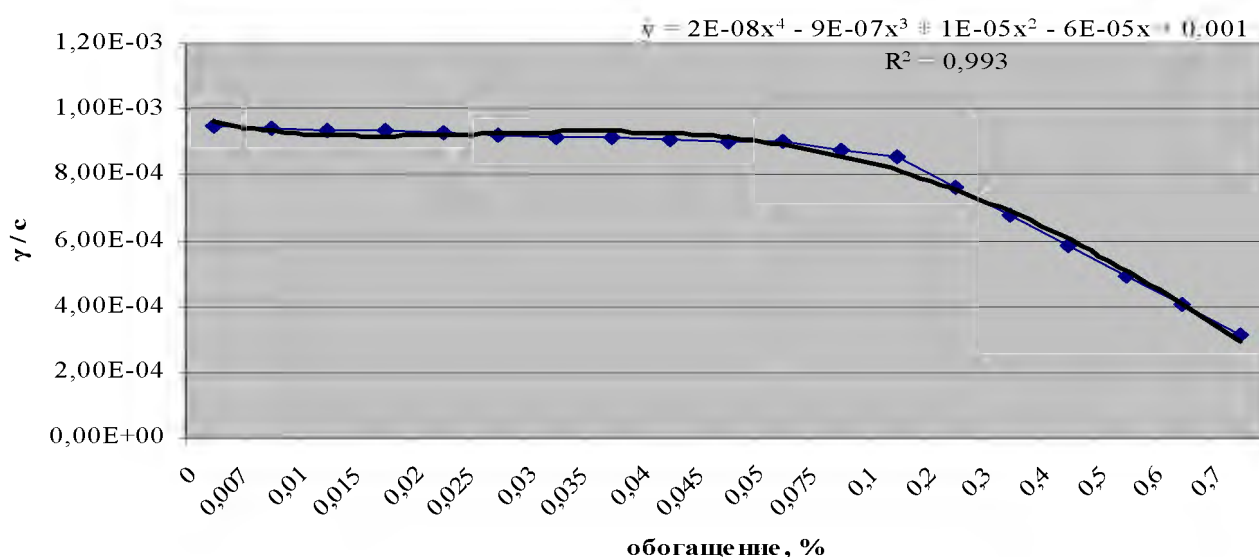


**Рис.1.** Суммарный выход мгновенных гамма-квантов, образующихся в процессе деления природного урана с энергией квантов в диапазоне  $4 \div 7$  МэВ

## Заключение

По результатам проведенных расчетов получен патент на изобретение [1]. Изобретение относится к области урановой промышленности и является оперативным способом определения обогащения урана по  $^{235}\text{U}$ .

Технический результат изобретения состоит в оперативном определении обогащения урана по  $^{235}\text{U}$  при известной интенсивности (мощности) испускаемых мгновенных гамма - квантов энергетического спектра  $4 \div 6,5$  МэВ при спонтанном делении ядер урана.

## Список литературы

1. Пат. 2633941 Российская Федерация, МПК МПК G01T 1/00. Способ оперативного определения обогащения урана по интенсивности испускания мгновенных гамма – квантов спонтанного деления [Текст] / Пономаренко П.А., Фролова М.А., Таборовская Е.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное автономное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет». науч.-исслед. ин-т связи. – № 2016121369 ; заявл. 30.05.16 ; опубл. 19.10.17, Бюл. № 29. – 2 с. : ил.
2. Мотыляев А. Уран: факты и фактики [химия и жизнь], 2014, №8. Доступен по адресу: <http://www.hij.ru/read/issues/2014/august/5021/>.
3. Гордеев И.В. Справочник по ядерно-физическим константам для расчета реакторов / И.В Гордеев, Д.А. Кардашев, А.В.Малышев // Издательство государственного комитета совета министров СССР по использованию атомной энергии. Москва. 1960г.

## References

1. Pat. 2633941 Russian Federation, IPC of the IPC G01T 1/00. A method for the operational determination of uranium enrichment in terms of the intensity of the emission of instant gamma quanta of spontaneous fission [Text] / Ponomarenko PA, Froldova MA, Taborovskaya EP; the applicant and the patent holder The Federal State Autonomous University of Higher Education "Sevastopol State University". connection. - No. 2016121369; claimed. 30.05.16; publ. 19.10.17, Bul. № 29. - 2 with. : ill.
2. A. Motilayev. Uranium: Facts and Figures [chemistry and life], 2014, №8. Available at: <http://www.hij.ru/read/issues/2014/august/5021/>.
3. I.V. Gordeev, D.A. Kardashev, A.V. Malyshev. Handbook on nuclear-physical constants for the calculation of reactors. Publication of the State Committee of the Council of Ministers of the USSR on the use of atomic energy. Moscow. 1960.

УДК 621.182.12:621.1.003

## Использование нанопорошка оксида кремния в качестве керамической матрицы для иммобилизации жидких радиоактивных отходов атомных станций с ВВЭР

С.А.Федорова<sup>1</sup>, В.М.Гавриш<sup>2</sup>, О.П.Гавриш<sup>3</sup>

ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,  
г. Севастополь, 299053, Россия., <sup>1</sup>s.a.fedorova@sevsu.ru, <sup>2</sup>VMGavrish@sevsu.ru, <sup>3</sup>5brachman5@gmail.com

Статья поступила 15.11.2017 г.; после доработки 23.11.2017 г.

---

### Аннотация

Рассмотрели основные источники образования жидких радиоактивных отходов на атомных станциях с ВВЭР и методы переработки. В качестве матрицы для иммобилизации отходов предложили нанопорошок оксида кремния. На модельном радиоактивном растворе исследовали изменения активности на гладкой и шероховатой поверхностях при добавлении нанопорошка оксида кремния. Полученные отходы иммобилизовали в керамическую матрицу. Проанализировали изменение среды, в которую погружена исследуемая керамика, на одновременное воздействие температуры и pH.

Ключевые слова: жидкие радиоактивные отходы, керамика, нанопорошок оксида кремния, активность.

---

## The use of silicon oxide nanopowder as a ceramic matrix for the immobilization of liquid radioactive waste from nuclear power plants with PWR

S.A.Fedorova<sup>1</sup>, V.M.Gavrish<sup>2</sup>, O.P.Gavrish<sup>3</sup>

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,  
Sevastopol, 299053, Russia., <sup>1</sup>s.a.fedorova@sevsu.ru, <sup>2</sup>VMGavrish@sevsu.ru, <sup>3</sup>5brachman5@gmail.com

Received 15.11.2017 y.; received in final form 23.11.2017 y.

---

### Abstract

Considered the main sources of formation of liquid radioactive waste at nuclear power plants with WWER and methods of processing. As a matrix for the immobilization of waste, nanopowder of silicon oxide was proposed. On the model radioactive solution, the changes in activity on a smooth and rough surface were investigated with the addition of silica nanopowder. The resulting waste was immobilized in a ceramic matrix. The change in the medium from which the ceramic was immersed was analyzed for the simultaneous effect of temperature and pH.

Keywords: liquid radioactive waste, ceramics, silicon oxide nanopowder, activity.

---

### Введение

В Законе РФ «Об обращении с радиоактивными отходами...» переработка радиоактивных отходов определена как технологические операции, выполняемые в целях изменения физической формы, агрегатного состояния и (или)

физико-химических свойств радиоактивных отходов для их последующего кондиционирования.

Кондиционирование радиоактивных отходов - технологические операции по приведению радиоактивных отходов в физическую форму и состояние, пригодные для их захоронения и со-

ответствующие критериям приемлемости. [1]

Росатом осуществляет конструктивное взаимодействие с Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ), Агентством по ядерной энергии Организации экономического сотрудничества и развития (АЯЭ ОЭСР), Комиссией государств – участников СНГ, по использованию атомной энергии в мирных целях. Госкорпорацией «Росатом» ведется активная работа по обеспечению ядерной и радиационной безопасности, реабилитации территорий, подвергшихся воздействию ядерных предприятий.

Работа в сфере обращения с радиоактивными отходами (РАО) направлена на создание современной инфраструктуры по обращения с радиоактивными отходами атомных станций (АС), которая должна обеспечивать безопасный сбор, первичную переработку РАО до состояния, пригодного для временного хранения, глубокую переработку и передачу РАО специализированным предприятиям на долгосрочное хранение и окончательное захоронение. Среди основных направлений деятельности эксплуатирующих организаций Росатома при обращении с РАО обозначена разработка и внедрение новых технологий обращения с РАО на АС [2], что обуславливает **актуальность исследования**.

В процессе эксплуатации АС образуются жидкие радиоактивные отходы (ЖРО) различного химического состава и активности, подлежащие сбору и переработке. Проблема накопления и безопасного хранения радиоактивных отходов является одним из факторов, ограничивающих развитие атомной энергетики. Постоянно ужесточаются международные требования к защите окружающей среды. В связи с этим в проектах АС выбор технологий обращения с радиоактивными средами определяется прежде всего необходимостью минимизации объемов образующихся радиоактивных отходов, а также требованием их безопасного долговременного хранения. [3]

Сегодня, в большей или меньшей степени, в конце цепочки обращения с ЖРО используют битумирование, цементирование и остекловывание:

- битумирование, процесс достаточно дешевый, однако имеет ряд недостатков, например, взрыво- и пожароопасность, нестойкость к воздействию микроорганизмам;
- цементирование – дешево, но воздействие ионизирующего излучения очень сильно уменьшает прочностные характеристики;

- остекловывание – процесс, дающий на выходе компаунды, удовлетворяющие все требования для безопасного хранения РАО, но является очень дорогостоящим.

В последнее время все больше внимания, как в РФ, так и за рубежом уделяется керамическим материалам [4-7]. В применении к РАО используют кремний и углеродсодержащую керамику с различными добавками. Фиксация радионуклидов в матрице в определенной мере зависит от степени измельчения исходного материала. Наиболее подходящими являются материалы в тонкоизмельченном состоянии. В публикациях [8, 9] отмечается уникальность наноматериалов. Так, радионуклиды, сорбирующиеся на наночастицах, позволяют уменьшить объемы РАО в разы [10].

Таким образом, **целью данной работы** является изучение возможности использования тонкоизмельченных природных материалов для формирования керамической матрицы, содержащей радионуклиды.

### Постановка задачи

1. Анализ основных источников образования ЖРО на АС и методов переработки.
2. Получение керамического образца на основе наноструктуры.
3. Исследование поведения полученных керамических образцов в различных средах.

### Описание исследования

#### Анализ основных источников образования ЖРО на АЭС

Основными источниками образования РАО являются:

- эксплуатация ЯЭУ (снятие с эксплуатации, изготовление ТВЭЛ и переработка ОЯТ);
- добыча урановых руд;
- эксплуатация исследовательских реакторов;
- изотопная продукция, используемая в медицине, науке;
- в результате эксплуатации АС.

Радиоактивные вещества образуются на АС в активной зоне реактора в результате ядерной реакции деления ядер  $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  и  $^{239}\text{Pu}$ . Это главный источник образования радиоактивных веществ на АС.

Кроме этого, они образуются и в результате реакций активации потоком нейтронов различных материалов находящихся в активной зоне реактора при работе его на мощности как про-

дукты реакций ( $n, \gamma$ ), ( $n, \alpha$ ) и ( $n, p$ ).

Радиоактивные отходы в зависимости от агрегатного состояния классифицируются на твердые (ТРО), жидкие (ЖРО) и газообразные (ГРО). В нашей работе мы остановимся на жидких РАО. К ЖРО относятся: растворы неорганических веществ, пульпы фильтроциклов, шламы, органические жидкости, которые имеют следующие радиационные характеристики:

- содержание отдельных радионуклидов превышает допустимые концентрации, используемые для населения и народного хозяйства;
- состав смеси радионуклидов таков, что сумма соотношения удельной активности каждого отдельного нуклида превышает 1.

К источникам образования ЖРО относятся контурная вода, конденсат турбин с подсосами охлаждающей воды в конденсаторы, протечки технической воды, воды от отмывки помещений и оборудования, растворы от дезактивации оборудования, пульпы перлита и т.п.

Неорганизованные протечки первого контура, протечки бассейна выдержки, воды дезактивации, сбросы душевых и спецпрачечных, сбросы лабораторий, регенерационные воды блочной обессоливающей установки и фильтров систем водоочистки, эксплуатационные промывки оборудования – относятся к трапным водам. В ходе переработки трапных вод образуются кубовый остаток, отработанные фильтрующие материалы и шламы и органические жидкости [2].

### **Переработка жидких радиоактивных отходов**

К методам переработки ЖРО относят [11] выпаривание, ионный обмен, ультрафильтрацию и т.п..

Выпаривание (концентрирование) – используется для уменьшения объема ЖРО. При использовании выпарных аппаратов может происходить уменьшение исходного объема в 20 – 100 раз. Существуют также специальные установки – установки глубокого упаривания, позволяющие получать концентрации солей (всех, а не только радиоактивных) до 400 – 1200 г/л (т.н. «солевой плава»). Концентрат в дальнейшем отверждается различными методами, либо, при получении высоконцентрированного солевого плава, сразу размещается в контейнеры на хранение.

Ионный обмен – очистка ЖРО происходит за счет прохождения ЖРО через ионообменную

смола (либо комбинацию нескольких смол). Метод широко распространен для очистки ЖРО с небольшим солесодержанием. Главный недостаток метода – жесткие требования к исходному химическому составу (для предотвращения «отравления» ионообменной смолы).

Ультрафильтрация, обратный осмос, электродиализ и т.п. – метод основан на принципе фильтрации через тонкую или полупроницаемую мембрану. Широко используется не только для радиоактивных отходов, но и в промышленности, и даже в бытовых фильтрах воды. Недостаток – относительно большое количество образующихся вторичных отходов (не очень большой коэффициент уменьшения объема) и большие энергозатраты.

Цементирование ЖРО – включение ЖРО в цементный матричный материал. Простым процессом отверждения отходов является заключение их в цементы, которое осуществляют смешением кубовых остатков или шламов с цементом. Смесь твердеет в емкостях, и полученные монолитные блоки удаляют на захоронение. Предложены различные варианты изменения составов неорганической матрицы и цементов добавкой различных глин, полимерных материалов и др.

Технологический цикл включает выделение радионуклидов из жидких отходов, с локализацией токсичных концентратов в минимальном объеме. При этом существенное внимание уделяют удалению балластных (нерадиоактивных) солей, что в свою очередь уменьшает затраты материалов при цементировании. Для получения механически – и коррозионностойких цементованных форм отходов, содержание как солей, так и нуклидов в бетоне не должно превышать определенной величины.

Прочность цементной массы зависит от количества включаемых солей и уменьшается с увеличением солесодержания. Для получения удовлетворительной механической прочности солесодержание исходного раствора не должно превышать 150 г/л. При большем солесодержании цементная масса плохо схватывается и прочный монолит не образуется. Механическая прочность блоков составляет 30 – 120 кгс/см<sup>2</sup>.

Высокая выщелачиваемость радионуклидов из цемента ограничивает количество радиоактивных веществ, которое можно включать в блоки. Реально цементированию подлежат концентраты среднего уровня активности ( $10^{-4}$  –  $10^{-5}$  Ки/л). Еще один недостаток метода цементирования – эрозия цементных блоков при хранении на открытом воздухе. Кроме того, при цементировании

объем продукта увеличивается. Все это приводит к тому, что применение метода цементирования ЖРО отходов ограничено и распространяется в основном на отходы исследовательских центров и в некоторых случаях на образующиеся в небольшом количестве отходы АС с невысокой активностью.

Для улучшения механической прочности и химической стойкости цементной массы проводятся исследования по обработке ее полимерными материалами.

Сравнение разных способов (битумирование и цементирование) отверждения РАО средней активности показывают, что все три типа матриц (битум, полимеры, цемент) являются монолитными без остатков свободной воды.

Цемент и полимеры более прочные вещества, их прочность определяется соответственно значениями 300 – 600 и 2000 кгс/см<sup>2</sup>, битум пластичен. Поэтому для битума требуется обязательная заливка в бочки, тогда как блоки из цемента и полимеров можно хранить без дополнительной упаковки. Однако в связи со значительной выщелачиваемостью, наблюдаемой у цемента, его хранение требует обеспечения гидроизоляции.

Цемент и полимеры обладают более высокой радиационной стойкостью. Битум при облучении более 10<sup>6</sup> Гр становится хрупким. Цемент огнестоек, полимеры горючи и частично разрушаются в огне, битум плавится и воспламеняется.

Наличие солей в воде для растворения цемента, из-за их влияния на процессы твердения, ограничивает содержание цементируемых ЖРО, что сопровождается необходимостью увеличения объемов растворов в результате их разбавления и, как следствие, к существенному увеличению объема конечного продукта. Однако более важным для характеристики качества готового компаунда является тот факт, что даже при условии полной гидратации используемого цемента около 75% воды после затвердевания компаунда остается в несвязанном состоянии.

Высокая пористость и низкая прочность компаунда не может гарантировать сохранность этого раствора в компаунде. При этом любые попытки снизить выщелачиваемость радионуклидов вряд ли окажутся эффективными, поскольку при отсутствии диффузионного контроля твердой фазы над этими процессами нельзя ожидать существенного их ограничения.

При цементировании [2,11,12] должно быть обеспечено управление технологическими параметрами процесса и контроль за ними, обес-

печивающими получение цементного компаунда со следующими основными показателями качества (табл.1):

**Таблица 1.** Показатели качества цементного компаунда

| Показатель качества                                                       | Допустимые значения                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Удельная активность компаунда:                                            |                                                                                                                       |
| бета-активность                                                           | $<3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/кг ( $1 \cdot 10^{-3}$ Ки/г)                                                                  |
| альфа-активность                                                          | $<3,7 \cdot 10^7$ Бк/кг ( $1 \cdot 10^{-6}$ Ки/г)                                                                     |
| Водоустойчивость (скорость выщелачивания радионуклидов по Cs-137 и Sr-90) | $<1 \cdot 10^{-3}$ г/см <sup>2</sup> сут                                                                              |
| Механическая прочность (предел прочности при сжатии)                      | $\geq 50$ кгс/см <sup>2</sup>                                                                                         |
| Радиационная устойчивость                                                 | Механическая прочность не менее 50 кгс/см <sup>2</sup> после облучения дозой 10 <sup>6</sup> Гр (10 <sup>8</sup> рад) |
| Водостойкость                                                             | Механическая прочность не менее 50 кгс/см <sup>2</sup> после 90-дневного погружения в воду                            |

Требования к методам контроля качества цементного компаунда устанавливаются нормативными документами.

Битумирование ЖРО – включение РАО в битумный матричный материал. В качестве битумного материала применяется битум - твердые или смолоподобные продукты, представляющие собой смесь углеводородов и их азотистых, кислородистых, сернистых и металлодержащих производных.

Битумы не растворимы в воде, полностью или частично растворимы в бензоле, хлороформе, сероуглероде и др. органических растворителях; плотностью 0,95 – 1,50 г/см<sup>3</sup>.

Используемый в качестве матричного материала битум должен удовлетворять следующим основным требованиям:

- температура вспышки не ниже 200°С;
- температура воспламенения не ниже 250°С;
- температура самовоспламенения не ниже 400°С.

В битумную матрицу не должны включаться ЖРО, компоненты которых вступают с ней в химическое взаимодействие, сопровождающееся:

- экзотермическими эффектами;
- образованием токсичных или взрывоопасных веществ;
- ухудшением качества образующегося компаунда.

Битумы непроницаемы, пластичны, химически инертны, невысокая стоимость, незначи-

тельное воздействие со стороны микроорганизмов.

Наряду с достоинствами метод битумирования имеет ряд недостатков, ограничивающих его применение. Горючесть битума (температура воспламенения 400°C) ограничивает возможность включения нитрит-нитратных отходов и требует учитывать возможность пожаров и взрывов. Сравнительно низкая теплопроводность битумных продуктов заставляет уменьшать объемную активность до 1 – 10 Ки/л, хотя чаще концентрирование отходов лимитируется солесодержанием, а не активностью.

Радиоактивные битумированные продукты содержат до 50 % солей. Конечные операции на всех установках битумирования – затаривание битумной массы, хранение или захоронение контейнеров с продуктами.

При битумировании [2,11,12] должно быть обеспечено управление технологическими параметрами процесса и контроль за ними, обеспечивающими получение битумного компаунда со следующими основными показателями качества (табл.2):

**Таблица 2. Показатели качества битумного компаунда**

| Показатель качества                                                       | Допустимые значения                                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Удельная активность компаунда:                                            |                                                                                                             |
| бета- активность                                                          | $<3,7 \cdot 10^{10}$ Бк/кг ( $1 \cdot 10^{-3}$ Ки/г)                                                        |
| альфа-активность                                                          | $<3,7 \cdot 10^7$ Бк/кг ( $1 \cdot 10^{-6}$ Ки/г)                                                           |
| Водоустойчивость (скорость выщелачивания радионуклидов по Cs-137 и Sr-90) | $<1 \cdot 10^{-3}$ г/см <sup>2</sup> сут                                                                    |
| Содержание свободной влаги в компаунде                                    | $<3\%$                                                                                                      |
| Термическая устойчивость                                                  | $t^\circ$ вспышки $>200$ °C;<br>$t^\circ$ воспламенения $>250$ °C;<br>$t^\circ$ самовоспламенения $>400$ °C |
| Радиационная устойчивость                                                 | Увеличение объема менее 10 % после облучения дозой $10^6$ Гр ( $10^8$ рад)                                  |

Стойкость получаемых отвержденных блоков с включенным и радиоактивными веществами – наиболее важная характеристика метода отверждения, определяющая надежность процесса захоронения. Стойкость блоков к воздействию среды определяется скоростью выщелачивания – количеством вещества или радионуклидов в граммах, которые переходят с 1 см<sup>2</sup> поверхности блока в 1сут.

Метод используется ограниченно в связи с

тем, что получаемый битумный компаунд является горючим веществом, что приводит к удорожанию его хранения.

Остекловывание отходов. Стекло, является нестехиометрическим соединением, при нагревании способно растворяться, а при последующем охлаждении прочно удерживать сложную смесь продуктов деления.

Стеклообразное состояние вещества – основная разновидность аморфного состояния, формирующегося при затвердевании переохлажденного расплава. Застывание переохлажденной жидкости в виде стекла происходит благодаря быстрому и непрерывному увеличению вязкости расплава при понижении температуры, что затрудняет структурные перестройки в нем, необходимые для энергетически более выгодной кристаллизации.

Вязкость расплава, обусловленная межмолекулярными силами, определяет степень склонности конкретной жидкости к стеклообразованию: чем сильнее связанность структуры жидкости, тем легче из расплава образуется стекло. Условия охлаждения оказывают большое влияние на процессы стеклообразования и кристаллизации. Критическая скорость охлаждения данного расплава (минимальная скорость, при которой образуется стекло) зависит от вязкости жидкости, температуры и теплоты кристаллизации.

Получаемый продукт обладает высокой химической и радиационной стойкостью, является изотропным, непористым. Главный недостаток стекла – его термодинамическая нестойкость, которая проявляется в кристаллизации стекла («расстекловывание») под действием высокой температуры, обусловленной радиоактивным распадом. Явления расстекловывания ухудшают первоначальные свойства продукта, в частности, возрастает скорость его выщелачивания.

Перспективность использования стекла в качестве иммобилизирующей матрицы обусловлена:

- высокой способностью включать в свой состав элементы независимо от заряда и размера их атомов;
- стойкостью к радиационному повреждению благодаря тому, что их собственный беспорядок допускает большое число атомных перемещений;
- относительной легкостью и дешевизной изготовления, поскольку не требует сложного оборудования;
- отлаженность работы технологии произ-

водства, литья, формовки и отжига.

Силикатные стекла представляют собой наиболее изученный и распространенный класс оксидных стекол, применяемых для иммобилизации радиоактивных отходов. Основой силикатных стекол служит оксид, стеклообразователь – диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . Оксиды, способные находиться в стеклообразном состоянии, например,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , составляют вместе с кремнеземом основу сложных по составу стекол. Трехмерный каркас, хаотически составленный из тетраэдров  $\text{SiO}_4^-$ , структурного элемента кремнезема, легко включает в свои пустоты оксиды, называемые модификаторами.

Тип связывания атомов ответственен за сложное поведение стекла, содержащего радиоактивные отходы, при его выщелачивании. При охлаждении в процессе изготовления, свойства аморфного вещества зависят только от температуры и скорости охлаждения. Скоростью охлаждения определяется «замороженная структура», чем выше скорость охлаждения, тем выше температура остеклования. При повторном нагревании твердого аморфного вещества характер изменения свойств зависит от скорости нагрева и от тепловой предыстории, т.е. от структуры, зафиксированной в образце. Процесс включения отходов в стекло заключается в добавлении оксидов, например, в виде кальцинированного порошка или шлама, к стеклообразующим материалам и последующем плавлении полученной смеси для образования гомогенной структуры.

### Керамизация РАО

Наряду с остекловыванием развивают и другие методы отверждения отходов, позволяющие получать материалы термодинамически более стойкие, чем стекло, сохраняющие длительное время механическую прочность и химическую стойкость. Это – стеклокерамика, керметы, витромет и различные виды минералоподобной керамики – суперкальцинаты, синрок, и др. При получении керамической формы используется прессование при высокой температуре кальцинатов отходов, при котором происходит синтез кристаллических соединений. Ионы радионуклидов включаются в кристаллическую решетку в виде твердых растворов и термодинамически стабильны в условиях захоронения. При иммобилизации отходов в однофазные керамики в качестве матриц применяют радиологически инертные материалы: кремнезем, глинозем,  $\alpha$ -кварц, муллит, рутил, поллу-

цит, цеолит, полевой шпат, апатит, сфен и др. Широкое распространение получила высокостойкая многофазная керамика, получившая название «синрок» (дословно – искусственная скала). Основными кристаллическими фазами этой керамики, включающими радиоактивные элементы, являются голландит, перовскит, цирконолит и сфен.

Керамические формы при плотности  $4 \text{ г/см}^3$  позволяют включать в них до 50 – 65 % отходов по массе, что значительно больше, чем стекло. Относительная кристаллохимическая изменчивость керамических форм отходов позволяет оптимизировать состав керамической матрицы. Гидротермальная и радиационная стойкость отдельных минеральных фаз обеспечивают долговременную стойкость керамической формы отходов. Так, в отношении выщелачиваемости актиноидов керамика – синрок на несколько порядков величины более стойкая, чем боросиликатное стекло.

При керамизации РАО особое внимание необходимо уделять размеру частиц из которых будет готовиться матрица, так как от этого во многом зависят ее свойства. В данной работе в качестве исходного сырья для керамического образца использовали оксид кремния, измельченный до порядка наночастиц.

На сегодняшний день применение природных материалов, продуктов органического и неорганического синтеза, а также достижений в разработке композиционных материалов, в отличие от использования нанотехнологий, практически исчерпало свои возможности в получении новых материалов с заданными свойствами. Поэтому во многих странах мира уделяется большое внимание развитию нанотехнологий. Современная тенденция к миниатюризации показала, что вещество может иметь совершенно новые свойства, если взять очень маленькую частицу этого вещества. Частицы, размерами от 1 до 1000 (свыше 100 нанометров наночастицами можно назвать их условно) нанометров обычно называют «наночастицами». Также существуют нанокompозиты – материалы, полученные введением наночастиц в какие либо матрицы. Большинство наноматериалов, такие как, например, дендримеры, фуллерин, нанотрубки, нанопрокладки и нанопоры, производятся из ограниченного количества видов сырья. Все наноматериалы, которые производятся в настоящее время, подразделяются на четыре группы: оксиды металлов, сложные оксиды (состоящих из двух и более металлов), порошки чистых металлов и смеси. Оксиды металлов со-

ставляют не менее 80 % всех производимых нанопорошков. Нанопорошки чистых металлов составляют значительную и все больше возрастающую долю общего объема производства. Количество сложных оксидов и смесей ограничено. Около 80 % всех порошков оксидов металлов составляют кремнезем, титания, глинозем. Пятую часть нанопорошков оксидов составляют семь нанопорошков – оксиды железа, цинка, церия, циркония, иттрия, меди и магнезиту.[13]

Кремнезем –  $\text{SiO}_2$ . Диоксид кремния, или кремнезем – это нанопорошок, которого в мире производится больше всего – 40 % общего объема производства нанопорошков.

### Методы получения нанопорошков

Основные методы получения наноматериалов можно разделить на ряд технологических групп: методы на основе порошковой металлургии, методы, в основе которых лежит получение аморфных прекурсоров, поверхностные технологии (создание покрытий и модифицирован-

ных слоев с наноструктурой); методы, основанные на использовании интенсивной пластической деформации; комплексные методы, использующие последовательно или параллельно несколько разных технологий.

Все группы методов получения нанопорошков можно условно разделить на две группы [14]. К первой группе можно отнести технологии, основанные на химических процессах, а ко второй – на физических процессах. (рис. 1)

Общей особенностью наночастиц порошков, полученных любым методом, является их склонность к объединению в агрегаты и агломераты.

В результате необходимо учитывать не только размеры отдельных наночастиц, но и размеры их объединений [15].

Четкого терминологического различия между агрегатами и агломератами провести нельзя, однако считается, что в агрегатах связь между кристаллитами прочнее, а межкристаллитная пористость меньше.



Рис.1. Основные методы получения нанопорошков

При последующем компактировании для достижения заданной пористости материала агрегатированные порошки требуют больших температуры и/или давления по сравнению с неагрегатированными.

Компактирование является технологиче-

ским процессом в результате которого из порошка получают готовую деталь. Процесс обычно проводят в две стадии: формовка и спекание. В ряде методов обеспечивается совмещение этих стадий в одну. Для получения объемных наноматериалов из порошков в основном

используется формовка при комнатной температуре с последующим спеканием.

Методы формовки. В порошковой металлургии в настоящее время применяются множество технологий формовки. Для прессования нанопорошков наиболее широкое распространение получила технология одноосного прессования. Используются такие его методы как: статическое (прессование в пресс – формах или штамповка), динамическое (магнитно – импульсное и взрывное) и вибрационное (ультразвуковое) прессование. Указанные виды прессования достаточно известны, повсеместно используются при формовке обычных порошков и достаточно широко освещены в литературе.

Методы спекания. Спекание формовок из нанопорошка ограничено невозможностью использовать высокие температуры. Повышение температуры спекания приводит к уменьшению пористости, но с другой стороны ведет и к росту зерна.

Эту проблему решают рядом методов активации, позволяющих добиваться получения низкой пористости изделий при более низких температурах спекания:

- применение высокоскоростного микроволнового нагрева (при увеличении скорости нагрева с 10 до 300 град/мин необходимая температура спекания нанопорошка  $\text{TiO}_2$  снижается с 1050 до 975°C);
- ступенчатое контролируемое спекание;
- плазмоактивированное спекание.
- проведение спекания в вакууме или восстановительных средах (для металлических порошков)

Для создания наноматериалов используются различные технологии, выбор которых зависит от типа и свойств получаемого материала.

В нашей работе мы использовали механическое измельчение. Керамические образцы получали ступенчатым контролируемым спеканием.

Любой керамический материал является многофазной системой. В керамике могут присутствовать кристаллическая, стекловидная и газовая фазы.

Структура технологий производства керамических заготовок из любых перечисленных масс в принципе однотипна: синтез массы, помол и смешение, приготовление полуфабриката (керамической порошкообразной массы со связкой), формование изделия, обжиг.

В качестве основных добавок чаще всего используют природные минералы, такие как полевой шпат  $(\text{Na}, \text{K}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$  (элементы,

фиксирующиеся в минерале - Ge, Rb, Sr, Ag, Cs, Ba, La...Eu, Tl), нефелин  $(\text{Na}, \text{K})\text{AlSiO}_4$  (элементы - Na, K, Rb, Cs, Ge), цеолиты  $(\text{Na}, \text{Ca})[(\text{Al}, \text{Si})_n\text{O}_m]_k \cdot x\text{H}_2\text{O}$  (элементы - Co, Ni, Rb, Sr, Cs, Ba) и другие. [16]

Большинство из добавок содержится в технологических средах АС. [17] Поэтому для формирования керамической матрицы возможно «извлечение» этих радионуклидов из водных сред поверхностью нанопорошка оксида кремния. Например, в процессе дезактивации конструкционного оборудования радионуклиды переходят в раствор.

Если извлечь их из раствора, то относительно «чистую» воду можно использовать повторно, а не увеличивать ее количество ЖРО. Кроме того, поскольку поверхность металлов в процессе эксплуатации становится неоднородной (коррозия, отложения и т.п.), то представляет интерес рассмотреть поведение нанопорошка на гладкой и шероховатой (подвергшейся коррозии) поверхностях.

### Экспериментальные исследования

В соответствии с поставленными задачами, эксперимент проводился в 4 этапа:

- получение нанопорошка оксида кремния;
- исследование степени очистки водных сред, загрязненных KCl, с помощью нанопорошка оксида кремния;
- получение керамической матрицы из наночастиц оксида кремния;
- исследование изменений керамической матрицы при одновременном воздействии температуры и водных сред с различным значением pH.

### Получение нанопорошка оксида кремния

В работе мы использовали технологию механического измельчения для получения нанопорошка оксида кремния.

В качестве исходного материала был взят природный материал - песок, основным компонентом которого является диоксид кремния  $\text{SiO}_2$ . Является достаточно дешевым материалом, имеет широкое применение в силикатной промышленности (цемент, стекло, керамика). Обладает способностью включения в свой состав ионов металлов из растворов (трапные воды, дезактивирующие растворы и др.). с помощью технологии механического измельчения был получен нанопорошок диоксида кремния с размером частиц порядка 10 – 100 нм. (рис. 2).



Рис. 2. Нанопорошок оксида кремния для исследования.

Определение размера полученных частиц проводилось путем сравнения на световом микроскопе (предел разрешения 0,25 мкм).

### Исследования поведения наноматериала на различных типах поверхности

Для корректного определения поведения нанопорошка оксида кремния с технологических средах было проведено исследование [18, 19, 20] по изучению изменения активности при использовании нанопорошка на различных поверхностях – гладкой и шероховатой.

Методика проведения испытаний:

- 1) приготовление раствора хлорида калия;
- 2) подготовка металлических образцов с различной поверхностью;
- 3) выдержка образцов в растворе;
- 4) измерение скорости счета;
- 5) анализ результатов.

В качестве модельного раствора был выбран 35 % (ПР=34,4 г/100г  $H_2O$ ) раствор хлорида калия, так как калий известен своей природной радиоактивностью – 16 Бк/г, что позволяет использовать его в учебных лабораториях. ПКД хлорида калия 360 мг/кг. Измерения проводились через 1, 3, 7 и 14 дней после погружения пластинок в раствор.

Скорость счета измерялась на альфа-бета радиометре УМФ-2000, Диапазон измерения  $\beta$  – изучения 0,1 – 3000 Бк; диапазон энергий регистрируемого  $\beta$  – изучения 50 – 3500 кэВ; относительная погрешность измерений  $\pm 15$  %.

Методика проведения измерения на радиометре:

- 1) взвешивается пустая подложка;
- 2) измеряется фон подложки;
- 3) взвешивается навеска исследуемого образца массой 0,05 г;
- 4) измерение в течении 500 с;

5) результат выводится на табло.

Скорость счета исходного сухого хлорида калия составила 156, 157 импульсов за 500 с для параллельных опытов соответственно.

Графическая зависимость изменения активности от времени приведена на рис. 3 по средним значениям 2-х параллельных опытов.

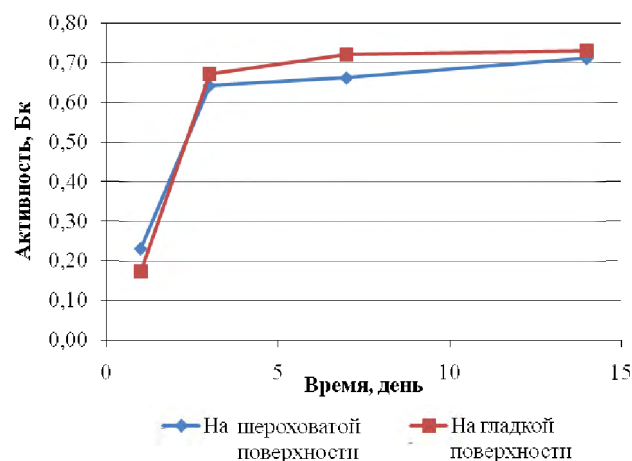


Рис. 3. Зависимость активности поверхностей образцов от времени.

Таким образом, можно сказать, что хлорид калия сорбируется на гладкой и шероховатой поверхности практически одинаково. Для дальнейшего исследования выбрана гладкая поверхность и время – 7 дней.

### Изучение изменения активности на гладкой поверхности при добавлении нанопорошка оксида кремния

Дальнейшие исследования проводились [18, 19, 20] при добавлении нанопорошка оксида кремния для «отмыва» гладких металлических образцов от хлорида калия.

Методика проведения исследования:

- 1) приготовление растворов с различным массовым содержанием нанопорошка оксида кремния;
- 2) выдержка «загрязненных» KCl пластинок с гладкой поверхностью в приготовленных растворах в течении 7 дней;
- 3) измерение скорости счета;
- 4) анализ результатов.

Пластины погружались в растворы с различным массовым содержанием наночастиц диоксида кремния (0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 7 и 10 %). Количество параллельных измерений – 2. По истечению 7 дней растворы отфильтровывались, осадок нанопорошка просушивался и проводилось измерение скорости счета очищенных пласти-

нок по описанной выше методике.

Для определения изменения активности в растворе, в котором находится пластинка с остатками KCl, полученными на предыдущем этапе исследований рассматривали разницу между активностью среды, обусловленной активностью пластины, и активностью сухого остатка (нанопорошка оксида кремния). Результаты измерений приведены на рис.4.

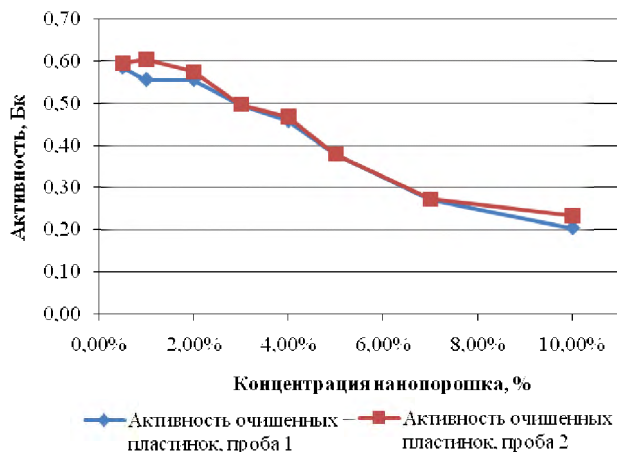


**Рис. 4.** Графическая зависимость активности отмытых пластинок от концентрации раствора

Использование нанопорошка диоксида кремния с концентрацией 7 – 10 % позволяет снизить активность пластины более, чем в 3 раза.

### Получение керамической матрицы из нанопорошка оксида кремния

Использование нанопорошка оксида кремния, а не другого материала, выбрано еще и потому, что его достаточно просто керамизировать. Нанопорошок оксида кремния сам, как таковой, является силикатной матрицей. В зависимости от температуры обжига можно получить различные материалы (рис. 5).

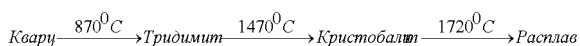


**Рис. 5.** Схема превращения песка в зависимости от температуры

Образующаяся при довольно высоких температурах (от 870 до 1470 °C), модификация тридимита имеет высокую механическую прочность и более пластичен чем кварц.

Тридимит является наиболее устойчивой модификацией кварца, и объем его незначительно изменяется при переходе из одной формы в другую. [21]

Для получения керамической матрицы со-

державшей хлорид калия отцентрифугированный осадок нанопорошка диоксида кремния был просушен, далее прессовался на гидравлическом прессе марки ПГ-100А (давление 10 000 т). Полученные образцы спекали в муфельной печи при температуре 900 °C (скорость роста температуры 200 °C в час). Дальнейший обжиг проводился при температуре 1290 °C при различной скорости. Первый образец при 350 °C в час, второй – при 200 °C в час.

Таким образом, были получены 2 образца керамической матрицы (рис.6).



**Рис. 6.** Керамическая матрица:

а) скорость спекания 350°C в час; б) скорость спекания 200°C в час.

### Исследование изменений керамической матрицы при одновременном воздействии температуры и технологической среды (рН)

Так как одной из основных проблем хранения РАО является выщелачиваемость компаундов, целесообразно исследовать полученные керамические матрицы на устойчивость в различных средах. [16]

Таким образом, полученные образцы последовательно кипятились на протяжении 6 часов в 3-х средах:

- дистиллированная вода;
- 10 % растворе NaOH;
- 10 % растворе HCl.

Для оценки изменения состава жидких сред измерялся показатель преломления с помощью рефрактометра. Каждый час проводился отбор пробы и измерялся показатель преломления.

Керамическая матрица полученная при скорости спекания 200°C в час – образец 1. Матрица полученная при скорости спекания 350°C в час – образец 2.

Для оценки степени выщелачиваемости мы использовали коэффициент преломления среды. Изменение этого показателя свидетельствует о появлении в среде компонентов из керамического образца.

Графическая зависимость изменения показателя преломления дистиллированной воды с

исследуемыми образцами при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  представлена на рис. 7.

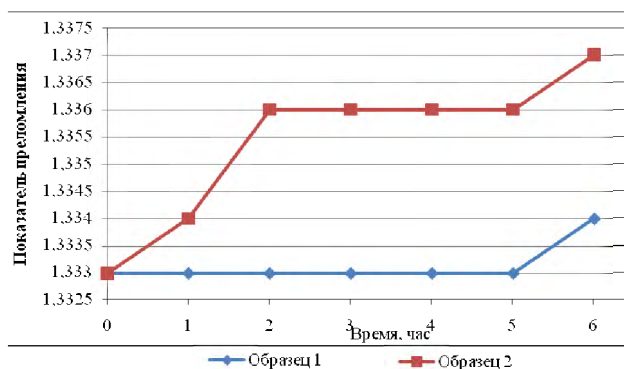


**Рис. 7.** Изменения коэффициента преломления среды (вода) с образцами при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  со временем

Как следует из приведенных зависимостей, образец, который обжигался со скоростью  $200^{\circ}\text{C}$  в час начал продуцировать компоненты своей матрицы в среду через 5 часов в количестве 0,08%.

Образец, скорость обжига которого составляла  $350^{\circ}\text{C}$  в час это же количество компонентов отдавал в технологическую среду уже через 1 час кипения в воде. Таким образом, снижение скорости спекания на  $30^{\circ}\text{C}$  снижает время выщелачиваемости при кипячении на 0,08% на каждый час.

Далее мы исследовали изменение показателя преломления водного раствора щелочи при кипячении в ней керамического образца. Графическая зависимость изменения показателя преломления раствора гидроксида натрия с исследуемыми образцами при температуре кипения представлена на рис. 8.

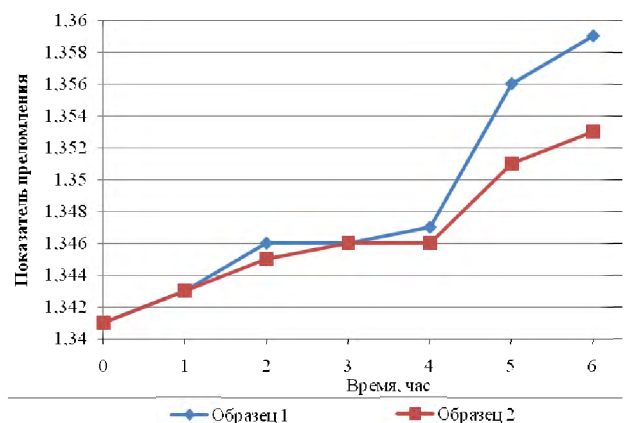


**Рис. 8.** Показатели изменения коэффициента преломления среды (гидроксид натрия) с образцом при температуре кипения со временем

Как следует из полученных зависимостей, чуть более устойчив в щелочных средах образец, полученный при скорости обжига  $350^{\circ}\text{C}$ . Первые четыре часа кипения образцы ведут себя примерно одинаково. Затем наблюдается увеличение продуцирования в технологическую среду компонентов керамической матрицы. На 0,45% и 0,90% соответственно.

Графическая зависимость изменения показателя преломления раствора соляной кислоты с исследуемыми образцами при температуре кипения со временем представлена на рис. 9.

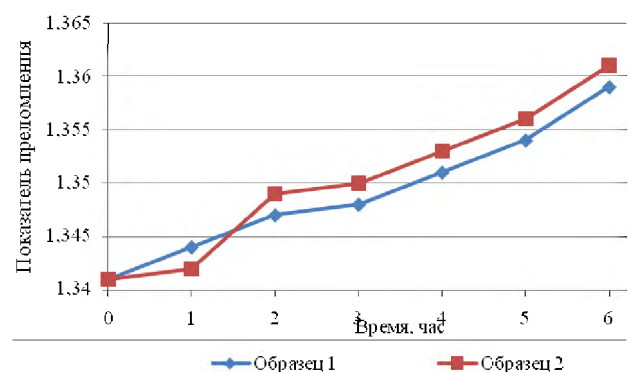


**Рис. 9.** Изменения коэффициента преломления среды (раствор соляной кислоты) с образцами при температуре  $100^{\circ}\text{C}$  со временем

В кислой среде оба керамических образца ведут себя примерно одинаково. Выщелачиваемость монотонно увеличивается за 6 часов кипения на 1,5%.

Анализируя полученные результаты можно сказать, что в водной среде под действием температуры показатели преломления более устойчивы для образца, получено при медленном обжиге. При кипячении образцов в растворе NaOH быстрее разрушался образец, полученный при скорости обжига  $200^{\circ}\text{C}$  в час. В случае с соляной кислотой разрушался образец, полученный при скорости  $350^{\circ}\text{C}$  в час.

## Выводы

Надежное, безопасное и эффективное обращение с радиоактивными отходами на конечной стадии топливного цикла – необходимый компонент ядерной индустрии. Только включение радиоактивных отходов в твердые матрицы при условии получения монолитной структуры обеспечивает надежную защиту окружающей среды от ионизирующего излучения. В ходе работы атомных станций в ВВЭР образуются ЖРО. Источникам образования ЖРО являются протечки первого контура, воды дезактивации,

сбросы душевых, спецпрачечных, лабораторий, регенерационные воды блочной обессоливающей установки и фильтров систем водоочистки, эксплуатационные промывки оборудования. В ходе переработки трапных вод образуются кубовый остаток, отработанные фильтрующие материалы и шламы и органические жидкости. По нашему мнению, наиболее перспективным материалом для отверждения таких ЖРО является керамика.

Особенностью керамизации является степень измельчения. И здесь можно использовать уникальность свойств наноматериалов.

В качестве исходного сырья для формирования керамической матрицы мы выбрали один из самых распространенных дешевых природных материалов – оксид кремния.

В соответствии с заданием был получен нанопорошок  $\text{SiO}_2$  по технологии, основанной на физических процессах (механическое измельчение). Размер полученных частиц был порядка  $10 - 100$  нм.

В ходе опытов с различным временем выдержки пластин в растворе было отмечено, что хлорид калия сорбируется на гладкой и шероховатой поверхности практически одинаково. Для дальнейшего исследования выбрана гладкая поверхность и время – 7 дней.

Исследовано изменение активности пластин в растворах, содержащих разные массовые концентрации нанопорошка оксида кремния. Показано, что целесообразно использование нанопорошка диоксида кремния с концентрацией  $7 - 10\%$ .

Спекание керамических образцов проводили при  $900^\circ\text{C}$  (первый обжиг). После этого образцы подвергались вторичному обжигу при  $1290^\circ\text{C}$ . Один образец при скорости роста температуры  $200^\circ\text{C}$ , второй – при  $350^\circ\text{C}$ .

Исследование влияния различных сред при температурах кипения показало, что в дистиллированной воде быстрее разрушался образец, полученный при скорости обжига  $350^\circ\text{C}$  в час. При кипячении образцов в растворе  $\text{NaOH}$  быстрее разрушался образец, полученный при скорости спекания  $200^\circ\text{C}$  в час. В случае с соляной кислотой разрушения проходили примерно с одинаковой скоростью.

Максимальная скорость разрушения наблюдалась для образцов в кислой среде, монотонно увеличивается за 6 часов кипячения на  $1,5\%$ . Минимальная скорость разрушения отмечена для образца со скоростью обжига  $200^\circ\text{C}$  в час в дистиллированной воде ( $0,08\%$  за 6 часов кипячения).

Результаты исследований согласуются с известными данными об образовании поверхностного слоя, замедляющего выход радионуклидов в контактные среды. [22]

Изучение влияния скорости и времени обжига образца на устойчивость к различным технологическим средам предполагается рассмотреть в дальнейшей работе.

### Список литературы

1. ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН ОТ 11.07.2011 N 190-ФЗ (РЕД. ОТ 02.07.2013) "ОБ ОБРАЩЕНИИ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ И О ВНЕСЕНИИ ИЗМЕНЕНИЙ В ОТДЕЛЬНЫЕ ЗАКОНОДАТЕЛЬНЫЕ АКТЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ" (С ИЗМ. И ДОП., ВСТУПАЮЩИМИ В СИЛУ С 16.07.2013)
2. [HTTP://WWW.CONSULTANT.RU/DOCUMENT/CONS\\_DOC\\_LAW\\_116552](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_law_116552)
3. Росатом. <http://rosatom.ru/about/international>
4. Радиационная обстановка на предприятиях Росатома. [http://www.russianatom.ru/enterprises/waste\\_management](http://www.russianatom.ru/enterprises/waste_management)
5. Лаверов Н.П., Юдинцев С.В., Коновалов Э.Е., Никольский М.С., Мишевец Т.О., Никонов Б.С., Омеляненко Б.И. Керметные матрицы для изоляции отходов с долгоживущими радионуклидами, изготовленные самораспространяющимся высокотемпературным синтезом // Радиохимия, т.54, №5, - 2012г. – С.572-475.
6. Царева С.М. Новые перспективные матричные материалы и технологии для иммобилизации радиоактивных отходов // Экология и развитие общества №4 (6), - 2012г. - С.80-84.
7. Пузырная Л.Н., Кобец С.А., Пшинко Г.Н. Иммобилизация солей радиоактивных кубовых остатков в стеклокерамических матрицах/Радиохимия - т.55 - Вып.4 - 2014. - С.362-364.
8. Габелков С.В., Логвинов Д.С., Саенко С.Ю., Таравос Р.В., Холомеев Г.А. Получение стеклокерамических и керамических материалов для изоляции радиоактивных отходов /Вопросы атомной науки и техники, Серия Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (13) - 2003. - С.172-174.
9. Богатыренко Ю.Е., Гавриш В.М., Дербасова Н.М. Диспергация микронных порошков тяжелых металлов для получения нанопорошков/ В сб.: Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности. Сборник статей по материалам научно-практической конференции. ФГАОУ ВО «Северский государственный университет». 2016. С. 155-159.
10. Бурьянская А.А., Гавриш В.М., Баранов Г.А., Гавриш О.П. Анализ влияния наномодификато-

ра порошка вольфрама на высокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 и клей эпоксидный ТУ 2252-003-62517430-01/ В сб.: Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности. Сборник статей по материалам научно-практической конференции. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». 2016. С. 189-194.

11. Снижение активности водных растворов  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{137}\text{Cs}$  с помощью наноматериалов / Н.И. Власенко, В.А. Герлига, Г.В. Жданова, В.Я. Козлов, И.А. Притыка // Ядерна та радіаційна безпека. — 2010. — № 1. — С. 16-18.
12. Никифоров А.С., Куличенко В. В., Жихарев М.И. Обезвреживание жидких радиоактивных отходов / А. С. Никифоров, В. В. Куличенко, М. И. Жихарев – Москва, Энергоатомиздат, 1985. – 184 с.
13. Радиоактивные отходы АЭС и методы обращения с ними / Ключников А.А., Пазухин Э. М., Шигера Ю. М., Шигера В. Ю. - К.: Институт проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2005. - 487 с.
14. <http://www.nanorf.ru/>
15. [http://studopedia.su/10\\_158477\\_metodipolucheniya-nanoporoshkov.html](http://studopedia.su/10_158477_metodipolucheniya-nanoporoshkov.html)
16. Патриляк К.И., Патриляк Л.К., Коновалов С.В. Термодинамический подход к прогнозированию влияния размерного фактора на свойства наноструктур // Теоретическая и экспериментальная химия – т.49, №1 – 2013г.- С.32-36.
17. <http://www.devase-gr.ru/8/index-keramika.htm>
18. Федорова С.А., Вовк Е.П. Использование керамических материалов при обращении с радиоактивными отходами// Тез. Всеукр. конф. «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности»/ тез. докл., Севастополь, 23 мая 2014 г. – Севастополь: СКУЭИП, 2014. – С. 61.
19. Федорова С.А., Вовк Е.П. Отчет НИР «Использование нанопорошка оксида кремния для очистки водных сред, загрязненных радионуклидами», шифр «Кремний», ч.1, 52с. Зарегистр. В СКУЭИП от 03.12.14г., №9.
20. Федорова С.А., Стрюк А.Е. Использование нанопорошка оксида кремния для снижения активности технологических сред./ Науч.-тех. конф. «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (г. Севастополь 15-18 июня 2016г.) – Севастополь - 2016.- С.66-70.
21. Федорова С.А., Магдыч Е.А., Вовк Е.П. Использование нанопорошка диоксида кремния при дезактивации модельных растворов./ Экология и развитие общества МАНЭБ №2(17), 2016 - С.45-48.
22. Справочник химика 21. Химия и химическая технология <http://chem21.info/info/500735>
23. Баринов А.С., Валакова Г.А., Стефановский С.В. Изменение структуры и свойств остекловывания радиоактивных отходов при договорном хранении на опытно образце / Атомная энергия -т105,- Вып.2, август - 2008. - С.87-93.

## References

1. Federal Law of 11.07.2011 N 190-FZ (as amended on 02.07.2013) "On the management of radioactive waste and on the introduction of amendments to certain legislative acts of the Russian Federation" (with amendments and additions that come into force on July 16, 2007. 2013)
2. [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_116552](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116552)
3. Rosatom. <http://rosatom.ru/about/international>
4. Radiation situation at the enterprises of Rosa-tom. [http://www.russianatom.ru/enterprises/waste\\_management](http://www.russianatom.ru/enterprises/waste_management)
5. Laverov N.P., Yuditsev S.V., Konovalov E.E., Nikolsky M.S., Mishevets T.O., Nikonov B.S., Omelyanenko B.I. Cermet matrix for isolation of waste with long-lived radionuclides, manufactured by self-propagating high-temperature synthesis, *Radiochemistry*, Vol.54, No. 5, - P.572-475.
6. Tsareva S.M. New promising matrix materials and technologies for the immobilization of radioactive waste // *Ecology and society development* №4 (6), - 2012г. - С.80-84.
7. Puzyrnaya L.N., Kobets S.A., Pshinko G.N. Immobilization of salts of radioactive residues in glass-ceramic mattresses / *Radiochemistry* - Vol.55 - Issue 4 - 2014. - P.362-364.
8. Gabelkov S.V., Logvinov D.S., Sayenko S.Yu., Taraz-R.V., Kholomeev G.A. Obtaining glass-ceramic and ceramic materials for insulation of radioactive waste / *Questions of Atomic Science and Technology*, Vacuum Series, Pure Materials, Conductors (13) - 2003. - P.172-174.
9. Bogatyrenko Yu.E., Gavrish V.M., Derbasova N.M. Dispersion of micron powders of heavy metals for the production of nanopowders / In: *Current Issues in Nuclear Chemical Technologies and Environmental Safety. Collection of articles on the materials of the scientific-practical conference*. FGAOU VO "Se-Vastopol State University". 2016. P. 155-159.
10. Burianskaya A.A., Gavrish V.M., Baranov G.A., Gavrish O.P. Analysis of the influence of nanomodifier of tungsten powder on high-molecular polyethylene GUR 4122 and epoxy adhesive TU 2252-003-62517430-01 / In: *Actual issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety. Collection of articles on the materials of the scientific-practical conference*. FGAOU VO "Sevastopol State University". 2016. P. 189-194.
11. Decrease in the activity of aqueous solutions of  $^{90}\text{Sr}$  and  $^{137}\text{Cs}$  with the help of nanomaterials / N.I. Vlasenko, V.A. Gerliga, G.V. Zhdanova, V.Ya. Kozlov, I.A. Pri-tyka // *Yaderna ta radiaciyna bezpeka*. - 2010. - No. 1. - P. 16-18.
12. Nikiforov A.S., Kulichenko V.V., Zhikharev M.I.

- Neutralization of liquid radioactive wastes / AS Nikiforov, VV Kulichenko, MI Zhikharev - Moscow, Energoatomizdat, 1985. - 184 p.
13. Radioactive waste from nuclear power plants and methods of handling them / Klyuchnikov A.A., Pazukhin E. M., Shigera Yu. M., Shigera V. Yu. - K.: Institute for Nuclear Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2005. - 487 sec.
  14. <http://www.nanorf.ru/>
  15. [http://studopedia.su/10\\_158477\\_metodi-polucheniya-nanoporoshkov.html](http://studopedia.su/10_158477_metodi-polucheniya-nanoporoshkov.html)
  16. Patrilyak K.I., Patrilyak L.K., Konovalov S.V. The thermodynamic approach to forecasting the effect of a size factor on the properties of nanostructures // *Theoreti Theoretical and experimental chemistry* - vol. 49, No. 1 - 2013r. - C.32-36.
  17. <http://www.devase-gr.ru/8/index-keramika.htm>
  18. Fedorova S.A., Vovk E.P. The use of ceramic materials in handling radioactive waste, Tez. Allukr. Conf. "Actual questions of nuclear-chemical technologies and environmental safety" / theses. dock, Seva-stoppol, May 23, 2014 - Sevastopol: SNUAEiP, 2014. - P. 61.
  19. Fedorova S.A., Vovk E.P. Research report "Use of silicon oxide nanopowder for the purification of aqueous media contaminated with radionuclides", the code "Silicon", p. 1, 52s. Registered users. In SNJAEiP of 03.12.14g., No. 9.
  20. Fedorova S.A., Stryuk A.E. Using nano-powder of silicon oxide to reduce the activity of technological media. / Hayч.-tex. Conf. "Actual issues of nuclear and chemical technology and environmental safety" (Sevastopol, June 15-18, 2016) - Sevastopol - 2016.- P.66-70.
  21. Fedorova S.A., Magdych E.A., Vovk E.P. The use of silicon dioxide nanopowder in the deactivation of model solutions / *Ecology and development of society* MANEB number 2 (17), 2016 - P.45-48.
  22. Reference book of the chemist 21. Chemistry and chemical technology <http://chem21.info/info/500735>
  23. Barinov A.S., Valakova G.A., Stefanovsky S.V. Changes in the structure and properties of vitrification of radioactive wastes during long-term storage on a prototype / *Atomic energy* -105, - Issue 2, August - 2008. - P.87-93.

УДК 630.867:661.183.2

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИГНИНОВЫХ ПРЕПАРАТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ ВОД

Н.И. Черкашина<sup>1</sup>*ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,  
г. Севастополь, 299053, Россия. <sup>1</sup>selyanskij-as@ya.ru*

Статья поступила 27.09.2017 г.; после доработки 31.09.2017 г.

### Аннотация

Приведены обобщённые результаты лабораторных испытаний сорбентов на основе лигнина для очистки шахтных вод урановых рудников. В результате анализа были получены коэффициенты очистки и распределения, которые являются количественными показателями эффективности сорбционных материалов.

*Ключевые слова:* сорбционные материалы, Фолиокс, фильтрация, коэффициент очистки, коэффициент фильтрации, лигнин

## USE LIGNINOV DRUGS FOR THE PURIFICATION OF MINE WATERS

N.I. Cherkashina<sup>1</sup>*FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,  
Sevastopol, 299053, Russia. <sup>1</sup>selyanskij-as@ya.ru*

Received 27.09.2017 y.; received in final form 31.09.2017 y.

### Abstract

The generalized results of laboratory tests of sorbents based on lignin for cleaning mine water uranium mines. The analysis was obtained decontamination factors and distribution, which are quantitative indicators of the effectiveness of sorption materials.

*Keywords:* sorption materials, Folios, filtration, purification coefficient, the coefficient of the filter is tion, lignin.

### Введение

Нестабильность на мировом рынке и дефицит традиционных видов ископаемого топлива, вновь вынуждает большинство стран мира пересматривать свои энергетические стратегии и возобновлять развитие ядерной энергетики.

Разработка урановых месторождений является важной составляющей ядерно-топливного цикла.

Несмотря на сравнительную безопасность атомной энергетики в целом, однако ее отдельные составляющие оказывают значительное влияние на состояние окружающей среды в общем и на человека в частности [1].

Добыча урановой руды является первым звеном в ЯТЦ. Основным фактором риска на урановых рудниках безусловно является радиационное воздействие на персонал и население близлежащих населенных пунктов, не менее значимым является факт загрязнения окружающей среды радиоактивными сбросами, такими как шахтные воды.

Уровни загрязнения образующихся шахтных вод в соответствии с действующим законодательством не позволяют сбрасывать последние непосредственно в гидрографическую сеть без их предварительной очистки [2]. С другой стороны очистка шахтных вод позволяет значи-

тельно сократить использование водных ресурсов, в виду их все более возрастающего дефицита, путем повторного использования очищенной воды в производственных целях.

Таким образом, несмотря на возросшие научные и технические возможности локализации сточных вод, проблема охраны открытых водоемов и поверхностных вод и, в частности, санитарной охраны водоемов от загрязнения шахтными водами остается актуальной. Поэтому нормирование количества различных загрязняющих веществ, которые могут быть сброшены в естественные водоемы, является одной из мер санитарной защиты водоемов.

Реализация этой меры в значительной степени зависит от критической оценки методов очистки шахтных вод, рациональной привязки очистных сооружений и эффективной их эксплуатации.

Количество сбрасываемых шахтных вод можно значительно сократить в результате повторного использования их для производственных нужд после очистки. В последнее время, все больше внимания уделяется поиску новой более экологически и экономически выгодной технологии.

В качестве одного из вариантов для очистки шахтных вод предлагается использование модифицированных сорбентов на основе лигнина, принципиальная возможность использования некоторых из рассматривается в данной работе.

Механохимическая обработка лигнина с неорганическими модификаторами приводит к активации и изменению количественного и качественного функционального состава его.

Полученный сорбционный материал может обладать ионообменными свойствами к полярным компонентам и адсорбционными по отношению к неполярным [3].

Преобладание того или иного свойства будет зависеть от способа модификации (введенных функциональных групп, увеличения поверхности контакта).

Нами исследована эффективность разработанной модификации органического сорбента и возможность его использования для очистки технологических сред от радионуклидов, солей и нефтепродуктов на штатных средствах очистки.

### **Постановка цели и задач научного исследования**

Целью научного исследования является разработка эффективного сорбционного материала на основе отходов растительного сырья.

Для достижения поставленной цели необходимо провести испытания сорбента на основе лигнина для очистки шахтных вод урановых рудников, определить некоторые сорбционные характеристики.

### **Порядок и параметры эксперимента**

Разработанные ранее сорбционные материалы на основе лигнина надежно локализируют радиоактивные вещества и органические примеси при переработке радиоактивных отходов АЭС [3-6].

Учитывая сложный химический состав шахтных вод (технологических сред применяемых в технологии разработки урановых месторождений) известные сорбционные материалы обладают недостаточной селективностью при очистке шахтных вод от урана и трансурановых элементов.

В работе исследованы свойства новых сорбентов «Фолиоокс» «КГО-Мо» и «КГО-W» (косточковый гранулированный ореховый), модифицированных в изотермических условиях в среде фосформолибденовых и фосфорвольфрамовых гетерополикислот (Мо и W), при очистке шахтных вод.

Полученные модификации сорбентов КГО-Мо и КГО-W помещали в хроматографические колонки  $d = 1,7 \text{ см}$   $h = 10 \text{ см}$  (высота слоя сорбента);  $m = 6,35 \pm 0,05 \text{ г}$  (масса сорбента),  $V_{к.о.} = 9,07 \pm 0,03 \text{ см}^3$  (колоночный объем сорбента в хроматографической колонке). Заполненные сорбентом колонки заполняли дистиллированной водой и выдерживали 12 часов после чего промывали до бесцветного фильтрата, устанавливая скорость фильтрации 2-3 мл/мин.

В качестве исследуемого раствора готовили модельный раствор  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  концентрации  $10 \text{ мг/дм}^3$  фильтрат собирался и пробы анализировались через интервалы фильтрации 0,25 к.о, 0,5 к.о, 0,75 к.о, 1,0 к.о, 1,5 к.о, 2,0 к.о. радиоактивность проб измеряли на радиометрической установке УМФ-2002.

Пробы фильтровались через колонку, наполненную лигнином, обработанного последовательно растворами КОН, щавелевой кислоты и пероксида водорода. После чего лигнин был высушен в сушильном шкафу при температуре  $100 - 120^\circ\text{C}$ .

Исследовалась зависимость коэффициента очистки и коэффициента распределения от pH, скорости фильтрации, объема пропускаемой пробы.

### Определение и анализ сорбционных характеристик

По результатам анализа рассчитывали коэффициенты очистки  $K_{оч}$  и распределения  $K_p$ , которые являются количественными показателями эффективности сорбционных материалов. Расчет вели по формулам (1) и (2):

$$k_{оч.п} = \frac{B_{исх.п.}}{B_{н.п.ф.}}, \quad (1)$$

где  $k_{оч.п}$  - коэффициент очистки исследуемого параметра (нефтепродукты, радионуклиды);

$B_{исх.п.}$  - величина исходного параметра (концентрация нефтепродуктов, суммарная активность исследуемого раствора);

$B_{п.п.ф.}$  - величина параметра после фильтрации (концентрация нефтепродуктов после фильтрации, суммарная активность раствора после фильтрации).

В качестве количественных характеристик взаимодействия сорбентов с радионуклидами  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{60}\text{Co}$  были рассчитаны коэффициенты распределения радионуклидов ( $K_p$ ,  $\text{см}^3/\text{г}$ ).

Расчет коэффициента распределения выполняли по формуле [7-8]:

$$K_p = [(a_0 - a_i) / a_i] \cdot V/m, \text{ мл/г}, \quad (2)$$

где:  $K_p$  - коэффициент распределения;

$K_{оч}$  - коэффициент очистки;

$A_{исх}$  - исходный уровень радиоактивного загрязнения модельного раствора;

$A_{исх} - A_{ост}$  - уровень радиоактивного загрязнения сорбента (после фильтрации раствора);

$V$  - объем исследуемого раствора, отфильтрованный на момент отбора пробы, мл;

$m$  - масса сорбента помещенного в хроматографическую колонку, г.

Исследования проводились в идентичных условиях для образцов КГО-Мо и КГО-W при значениях pH равных 10,5; 7,0; 3,5.

Результаты лабораторных исследований и стендовых испытаний приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Результаты лабораторных исследований проведенные при pH=3,5

| К.О.<br>(мл) | W,<br>мл/мин | $A_{исх}$ | $A_{фMo}$ | $A_{фW}$ | $A_{сор. Mo}$ | $A_{сор. W}$ |
|--------------|--------------|-----------|-----------|----------|---------------|--------------|
| 4,47         | 2            | 900       | 255       | 240      | 645           | 660          |
| 9,55         | 2            | 900       | 230       | 210      | 670           | 690          |
| 14,325       | 2            | 900       | 150       | 125      | 750           | 775          |
| 19,1         | 2            | 900       | 100       | 85       | 800           | 815          |
| 28,65        | 2            | 900       | 115       | 90       | 785           | 810          |
| 38,2         | 2            | 900       | 140       | 105      | 760           | 795          |

Более наглядно результаты лабораторных исследований отражены на рис. 1, 2.

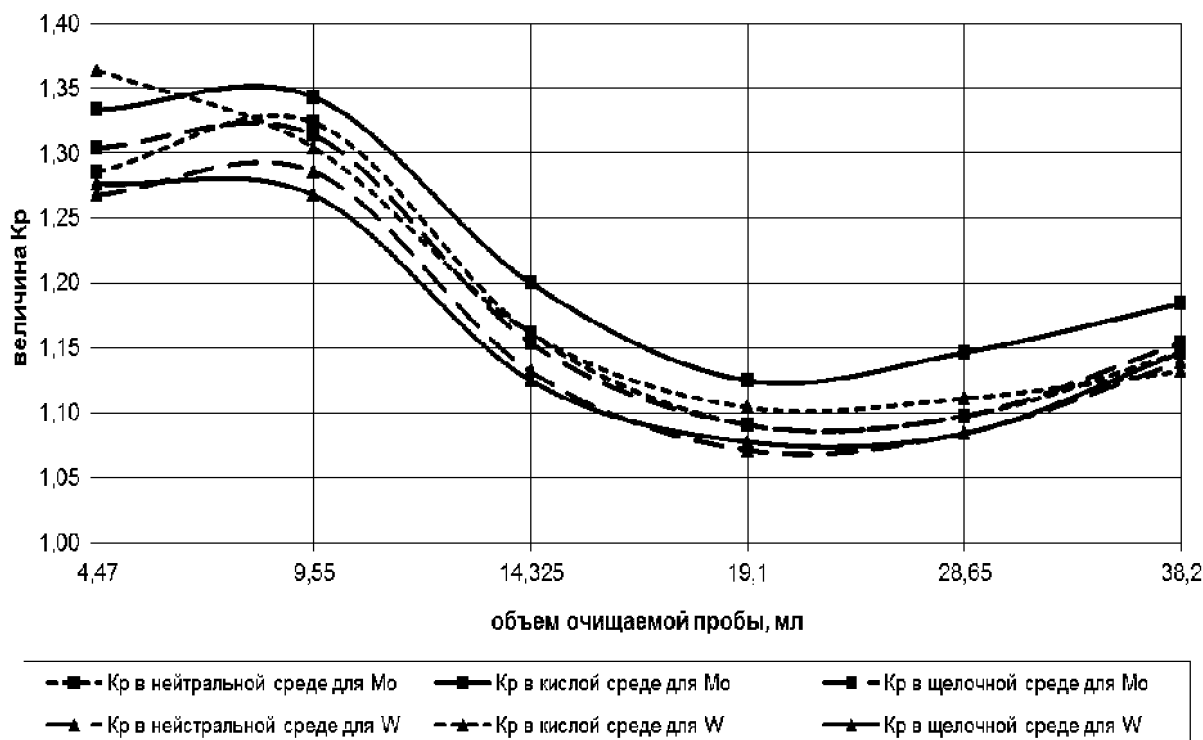


**Рис. 1.** График зависимости коэффициента очистки  $K_{оч}$  от колоночного объема для различной реакции среды при использовании сорбента КГО-W и КГО-Мо.

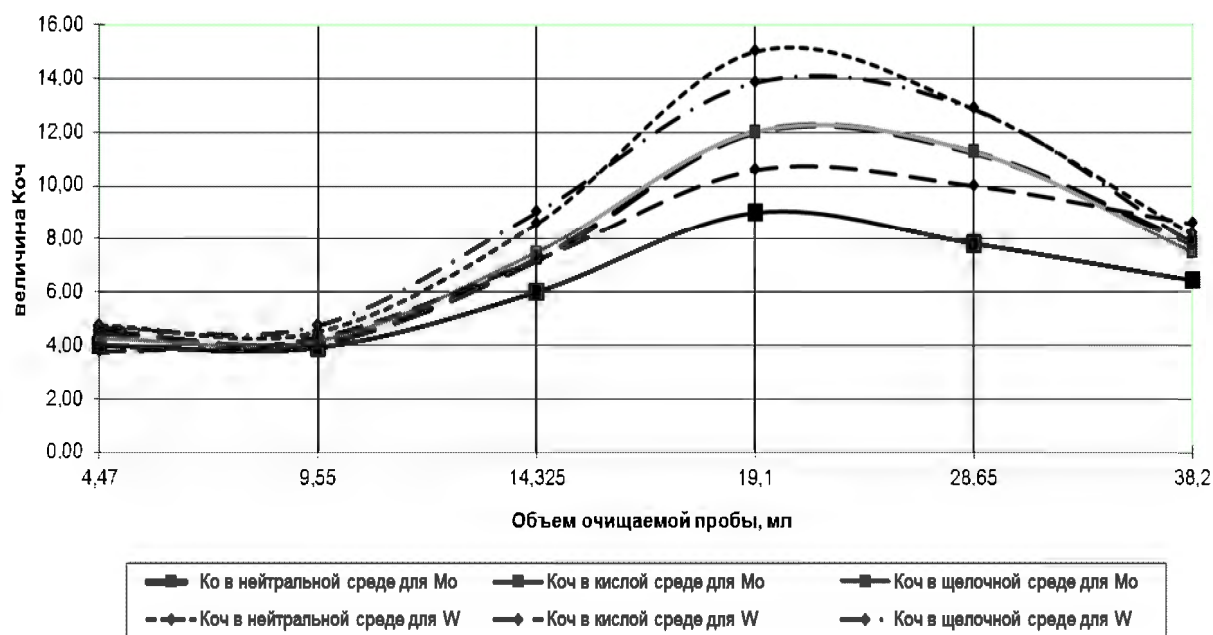


**Рис. 2.** График зависимости коэффициента распределения  $K_p$  от колоночного объема для различной реакции среды в случае использования сорбента КГО-W и КГО-Mo.

Приведенные выше коэффициенты очистки и распределения показывают эффективность использования данного сорбента для очистки шахтных вод от урана и трансурановых элементов. Установлено, что оптимальными параметрами, обеспечивающими наибольшую эффективность очистки являются следующие.

Скорость фильтрации – 2 мл/мин, при  $pH=3,5$   $K_{оч}=9-10$ ,  $pH=7$   $K_{оч}=12-15$ ,  $pH=10,6$

$K_{оч}=13-14$ ; при практически стабильных коэффициентах распределения  $K_{p\ W}=1.3-1.35$ ,  $K_{p\ Mo}=1.3-1.4$  в установленных границах  $pH$ .

Исследования проводились с использованием ФЭК-56. Результаты экспериментов приведены в виде графиков, а зависимости коэффициентов очистки и распределения от  $pH$  представлены на рис. 3 и 4.

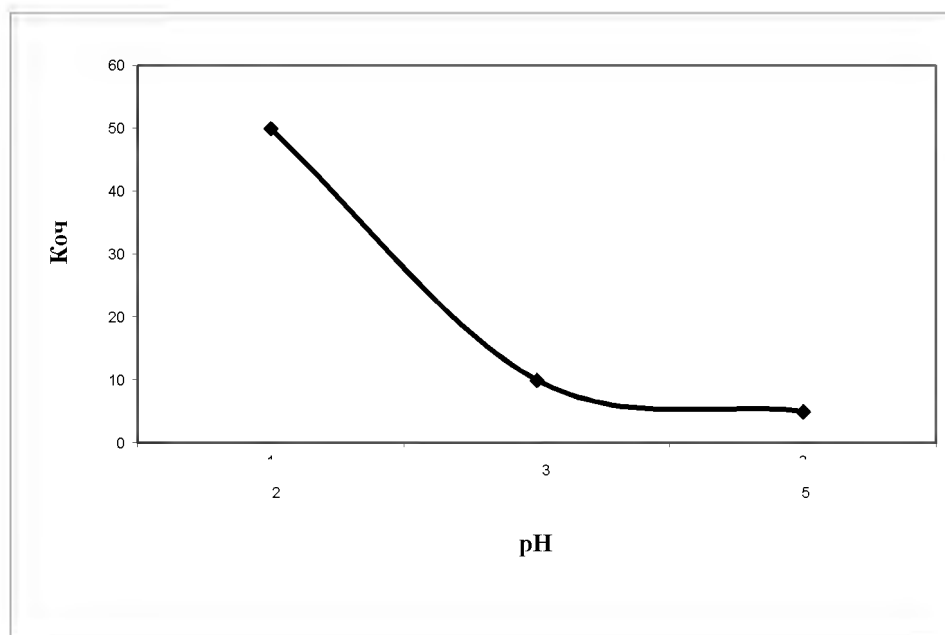


**Рис. 3.** Зависимость коэффициента очистки от  $pH$  для сорбента КГО-W

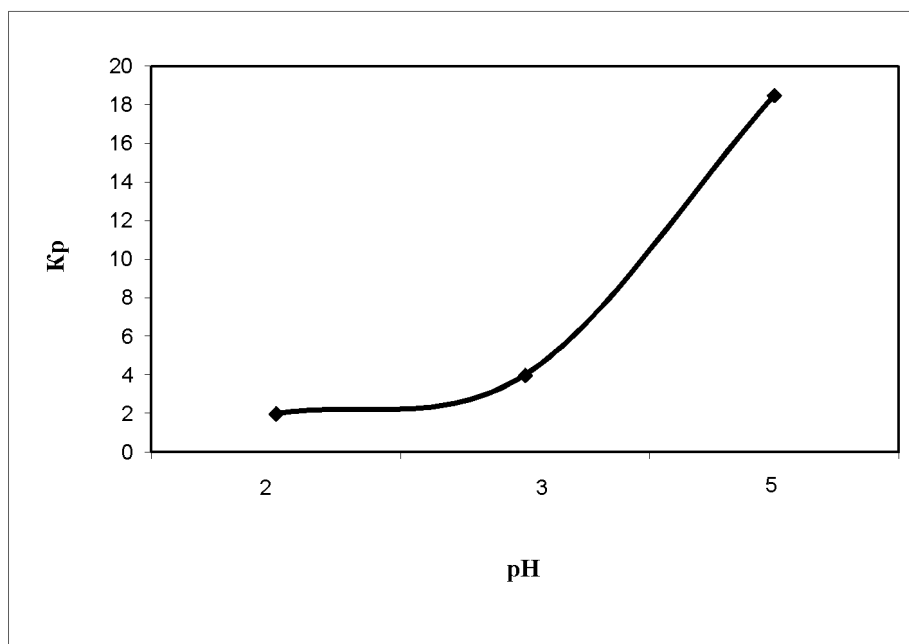


Рис. 4. Зависимость коэффициента распределения от pH для сорбента КГО-W

Наблюдаются довольно высокие значения коэффициента очистки. Из графиков зависимостей видно, что с ростом pH, объема пробы и скорости фильтрации наблюдается понижение коэффициента очистки и рост коэффициента распределения.

### Выводы

Установлено, что данный сорбционный материал хорошо сорбирует не только нефтепродукты, но другие примеси, это дает возможность использовать данные модификации сорбента «Фолиокс» наряду с промышленными селективными неорганическими сорбентами для очистки технологических сред сложного качественного и количественного состава.

Отмечено, что после очистки шахтных вод уранодобывающих рудников среда соответствует санитарным нормам для сброса в окружающую среду и не относится к категории жидкие радиоактивные отходы. По результатам испытаний можно сделать вывод о перспективности и возможности использования сорбента для очистки технологических сред с высоким содержанием и концентрацией радионуклидов, а также для очистки от нефтепродуктов и других органических примесей. Использование сорбентов типа «Фолиокс» позволит заменить фильтрующий материал на основе активированных углей и перлита и одновременно уменьшить нагрузку на ионитовые фильтры, предназна-

значенных для очистки технологических сред от радионуклидов, увеличивая их фильтроцикл.

### Список литературы

1. Мартовицкий В.Д. Шахтная вода как ресурс водоснабжения (состояние, проблемы, перспективы) / В.Д. Мартовицкий, Д.П. Родин, М.Е. Григорюк и др. ж. Инженерная Экология, М.: - 2005. - №2. - С. 27-40.
2. 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.
3. Пат. 78908 Украины, МПК51 В 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун-т ядерной энергии и промышленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
4. 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; опубл. 12.07.13, Бюл. № 23 (I ч.). – 6 С.
5. 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.

6. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов / Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СТУЭИП, 2011. – С. 22.
7. 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.
8. 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. Fedoseeva, O. P., Tunitsky N. N., Cherneva, E. P. Investigation of the kinetics of the complete exchange of cations on sulfonol // research in the field of ion exchange, the distribution and sedimentary chromatography. – M.: publishing house of the Russian Academy of Sciences, 1999. – P. 63-69.
2. 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.
3. Cherkashina N.I., Erofeev V. A., Pat. 93824 Ukraine, IPC 51 B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. Metod proizvodstva modifitsirovannogo kostochkovogo sorbenta "Foliox- MSP" [A method of producing stone of the modified powder of organic sorbent "Foliox- MSP"]; the applicant and patent-winner of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2010 04280; .. 13.04.2010 ; publ. 12.07.10. – P 5.
4. Cherkashina N.I., Erofeev V. A. Pat. 93824 Ukraine. Texnologija 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.
5. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A. Ochistka trapnix vod I texnologicheskikh sred pervogo kontura ot radionyklidov 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.
6. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkikh radioaktivnix otxodov[The technology of obtaining sorption materials based on lignin for utilization of LRW] The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences – Sevastopol: publishing house SNUNE and industry 2011. – P. 22.
7. Cherkashina N.I., 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.
8. Cherkashina N.I., Vedischeva 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.

УДК 628.16:537.622

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНИТОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖИДКИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕД НА ПРИМЕРЕ СВО-5

Н.И. Черкашина<sup>1</sup>, А.О. Литвинова<sup>2</sup>*ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.**<sup>1</sup>Selyanskij-AS@yandex.ru, <sup>2</sup>oleksandra.litvinova@mail.ru*

Статья поступила 27.11.2017 г.; после доработки 30.11.2017 г.

### Аннотация

Предложено математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, зависимость динамической обменной емкости представлена в программе Delphi7 на примере системы СВО-5. Приведены теоретические и экспериментальные данные по конкурентной сорбции катионов металлов  $\text{Cu}^{2+}$ , анионов  $\text{Cl}^-$ , на коммерчески доступных ионообменных сорбентах в форме гранул.

**Ключевые слова:** математическое описание, фильтрация, граничные условия, ионообменные материалы, ДОО, сорбция, обменная емкость, система СВО-5, насыпная масса сорбента.

## Determination of some characteristics of ion exchangers for purification of liquid technological environments on the example of the SVO-5

N.I. Cherkashina<sup>1</sup>, A. O. Litvinova<sup>2</sup>*FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.**<sup>1</sup>selyanskij-as@ya.ru, <sup>2</sup>oleksandra.litvinova@mail.ru*

Received 27.11.2017 y.; received in final form 30.11.2017 y.

### Abstract

The mathematical description of the filtering process, boundary conditions, the dependence of the dynamic exchange capacity presented in the program Delphi7 case of a system of SWC-5. Theoretical and experimental data for competitive adsorption of metal cations  $\text{Cu}^{2+}$ , anions  $\text{Cl}^-$ , commercially available ion-exchange sorbents in the form of granules.

**Keywords:** mathematical description, filtering, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, water cooling system SWC-5, bulk weight of the sorbent

### Введение

Многообразие химических производств, огромное число химических продуктов (исходных, промежуточных и конечных), применяемых и образующихся в технологических процессах, обуславливают образование сильно отличающихся по составу и объему сточных вод, загрязненных органическими и неорганическими веществами [1].

Чаще всего сточные воды представляют со-

бой сложные системы, содержащие смеси различных подсистем.

Концентрации примесей в сточных водах различны: воды от охлаждения продуктов и аппаратуры практически не загрязнены, а воды от технологических процессов содержат загрязняющие вещества в больших количествах [2].

Промышленные сточные воды содержат целый ряд чрезвычайно токсичных примесей, но наиболее опасны для окружающей среды ионы тяжелых металлов – кадмия, меди, цинка, хрома,

никеля, свинца. При адсорбции из растворов наряду с поглощением нейтральных молекул может происходить адсорбция ионов, содержащихся в растворе. При этом ион, заряженный положительно, адсорбируется преимущественно на сорбентах с отрицательно заряженной поверхностью, и наоборот.

Эти процессы обычно сопровождаются явлением обмена ионами между адсорбентом и раствором – так называемой ионообменной адсорбцией.

Процесс сорбции может осуществляться в статических условиях (аппараты с перемешивающими устройствами), а также в динамических условиях (фильтры, аппараты с псевдосжиженным слоем).

Основным материалом, используемым в качестве сорбента в настоящее время, являются:

- катионит КУ-2-8 – это сильнокислотный катионит гелиевой структуры, активная

группа – сульфогруппа, размер зерен – 0,315...1,25 мм, полная статическая обменная емкость – 1,8 мг-моль/см<sup>3</sup>, динамическая емкость – 526 г-моль/м<sup>3</sup> (применяют для разделения и удаления цветных и редких металлов в гидрометаллургии, при очистке оборотных и сточных вод, для регенерации отходов гальванотехники и металлообработки и др.) [3];

- анионит АВ-17-8 – это сильноосновный анионит, активная группа – четвертичные триметиламмониевые группы, размер зерен – 0,315...1,25 мм (применяется в гидрометаллургии, для очистки сточных и оборотных вод, в водоподготовке, химической промышленности и др.) [4].

В данной работе рассматривались механические, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5 (рисунок 1) [5].

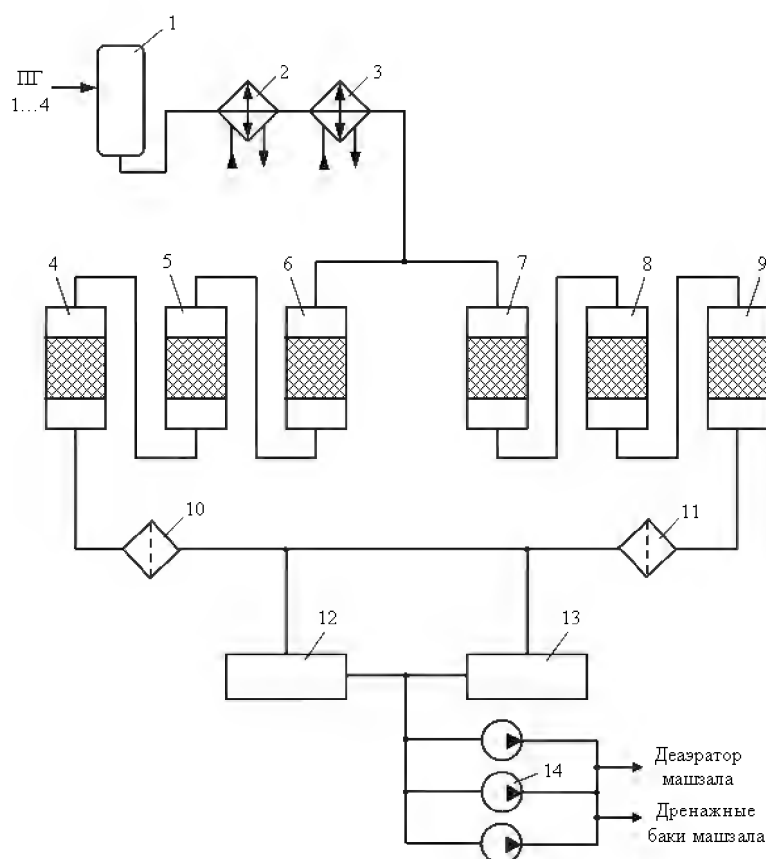


Рис. 1. Функциональная схема системы СВО-5:

1 – расширитель продувки; 2 – регенеративный теплообменник продувки; 3 – доохладитель продувки; 6,7 – механический фильтр; 5,8 – катионитовый фильтр; 4,9 – анионитовый фильтр. 10,11 – фильтр-ловушка; 12,13 – бак очищенной воды; 14 – насосы очищенной воды.

Система СВО-5 (рис. 1.) состоит из двух основных и одной резервной ниток для двух блоков АЭС (но могут быть и другие варианты).

Производительность одной нитки составляет примерно 40...50 м<sup>3</sup>/ч.

Каждая основная нитка состоит из механи-

ческого, катионитового, анионитового фильтров, ловушки зернистых материалов, бака очищенной воды и насосов бака очищенной воды. Резервная нитка включает в себя механический, катионитовый, анионитовый фильтры и ловушку зернистых материалов.

Катионирование натрием применяется в большей степени в процессе извлечения ионов тяжелых металлов из однокомпонентных растворов различного характера, чтобы обеспечить последующую утилизацию их соединений.

В очистке многокомпонентных сточных вод со слабой концентрацией применяют большей частью Н-катионирование. Экономичность и эффективность от извлечения указанных ионов ионным обменом, зависит от концентрации их в водостоках, значения pH, от общей минерализации воды, от наличия и сконцентрированности ионов железа и кальция. Показатель увеличения общей минерализации водостоків значительно снижает долю сульфокатионитов и в малой степени сказывается на содержании карбоксильных катионитов. Однако их можно применять только в очистке слабощелочных или нейтральных сточных вод.

Сущность способа заключается в том, что глубина сорбционного извлечения меди из проточных растворов определяется большим количеством факторов, как правило, достаточно легко и технологично регулируемых и важных для разработки научных представлений и технологической реализации процесса. К ним следует отнести, в частности, удельную массу сорбента по активному началу, характер и уровень его предварительной подготовки, включая, например, кислотную и термическую обработки, pH исходных растворов, линейную скорость потока, а также время до проскока сорбируемых ионов. Не меньшее значение имеет высота слоя сорбента.

Поскольку большинство ионитов представляют собой твердые тела, ионный обмен имеет сходство с адсорбцией, по этой причине иногда называют ионный обмен ионообменной сорбцией, а иониты – ионнообменными сорбентами [9].

Математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, рассчитанный коэффициент фильтрации представлен в программе Delphi7 на примере системы СВО-5.

Для определения кинетических параметров сорбции на сорбентов использовали растворы, содержащие ионы  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , температурные интервалы исследований коэффициента диффузии Д 25...45...60°C.

Модельную полную статическую обмен-

ную емкость (ПСОЕ) ионитов определяли исходя из расчета общих гидроксидов по формуле [6-9]

$$\sum_{OH}^{COOH} = \frac{25H \cdot \text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 10C}{A[100 - (W + 3)]} + \frac{25H \cdot 12,52H(\text{HCl})a\text{H}\text{Ba}(\text{OH})_2 \cdot 10C}{A[100 - (W + 3)]} \text{ мг} \cdot \text{экв/г}, \quad (1)$$

где а – количество мл  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , пошедшее на обратное титрование;

А – навеска ионита (сухого), г;

W – влажность ионита, %;

3 – зольность сорбента, %.

С целью определения общего количества функциональных групп, определяющих модельную ПСОЕ, функциональный анализ проводили по методикам [10].

Экспериментальная статическая обменная емкость (ПСОЕ) ионита (мг-экв/г) вычислялась на основании экспериментальных данных по формуле [9]

$$A = \frac{C_0 - C}{m} \cdot V, \quad (2)$$

где  $C_0$  и  $C$  – исходная и конечная концентрация в растворе моль/дм<sup>3</sup>; V – объем раствора, дм<sup>3</sup>; m – масса навески ионита, г.

Общий порядок расчета по уравнению состоит в следующем: каждая кинетическая кривая ионного обмена представляется набором их по методу равновесно-кинетического анализа точечные значения продолжительности процесса используются непосредственно, а текущая концентрация  $C$  пересчитывается ( $z - z_0$ ) по выражениям:

$$Z - z_0 = nt; \quad (3)$$

$$z_0 = \ln A. \quad (4)$$

В этом случае необходимо ввести количественный учет случайных и регулярных отклонений в экспериментальных данных, в особенности это относится к нарушениям изотермичности или нестационарности режима перемешиваемости в начальной стадии процесса.

Модельная формально-кинетическая продолжительность процесса  $t$  будет складываться из фактической (экспериментальной)  $t_0$  и поправочной  $\Delta t$ , поэтому вместо выражения (3) получаем:

$$(z - z_0) = n(t_0 + \Delta t)$$

или

$$(z - z_0) = nt_0 + n\Delta t. \quad (5)$$

По уравнению (5) каждая кинетическая кривая сорбции состоит из набора экспериментальных массивов  $t$  и  $C$ .

Для обработки экспериментальных данных

по методу экспериментально-кинетического анализа точечные значения продолжительности процесса используются непосредственно, а текущая концентрация  $C$  пересчитывается на  $(z - z_0)$  по выражениям (3) и (4).

При этом, возникает необходимость определения точного значения равновесной концентрации металла в сорбенте, соответствующей полной статической обменной емкости (ПСОЕ). Для этого в расчетах по каждой кинетической кривой в уравнении (1) задается первое поисковое значение ПСОЕ, например, заведомо меньше экспериментальной равновесной концентрации, затем рассчитывается  $(z - z_0)$  и далее по методу наименьших квадратов вычисляется  $n$  и  $\Delta nt$ , по которым определяются расчетные значения  $(z - z_0)_p$ , которые затем сравниваются с  $(z - z_0)$  по величине коэффициента корреляции, справедливого для линейных многофакторных зависимостей

$$\frac{dF}{A - BF} = ndt,$$

где  $F = \frac{\bar{C}}{\text{ПСОЕ}}$  – степень насыщения сорбента;

ПСОЕ – полная статическая емкость сорбента (экспериментальная):

$$A = \frac{\bar{C}_0}{\text{ПСОЕ}}; B = \left( \frac{m_0}{W} + 1 \right); n = \frac{3m_0}{r_0 \cdot c} \cdot \frac{D}{\delta},$$

где  $D$  – коэффициент внешней диффузии;

$\rho$  – плотность сорбента;

$\delta$  – толщина диффузионного слоя.

## Эксперимент

Для приготовления всех растворов использовались реактивы качества не ниже ч.д.а. и бидистиллированная вода. Необходимую для экспериментов величину pH получали добавлением азотной кислоты. Перед проведением экспериментов все ионообменные материалы промывали раствором хлорида натрия (10 г/л), а затем бидистиллированной водой до нейтральной величины pH смыва.

Концентрация ионов меди и хлора в рабочем растворе составляют:

- $C_{Cu} = 50-250$  мг/л;
- $C_{Cl} = 10-100$  мг/л.

В диапазоне концентраций получены значения динамической обменной емкости (ДОЕ) для АВ-17-8 и КУ-2-8 приведены на рисунках 2 и 3. Используя математическое описание процесса фильтрации представленное в программе Delphi7 можно выбрать оптимальные сорбцион-

ные материалы, их возможные комбинации для реализации различных задач при сорбционной очистке сточных вод.

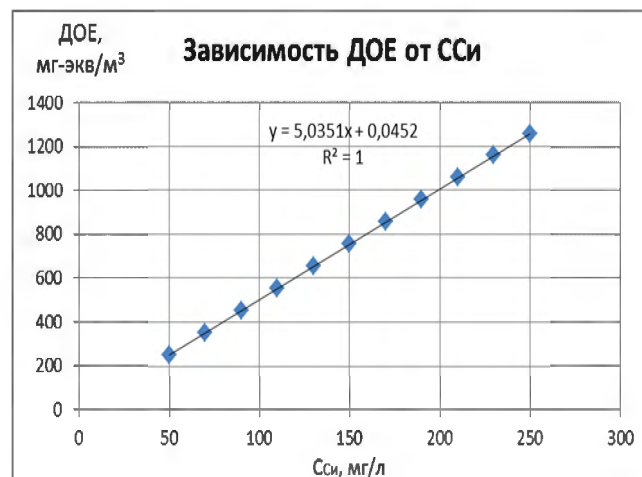


Рис. 2. Зависимость ДОЕ от концентрации ионов меди в очищаемой среде.

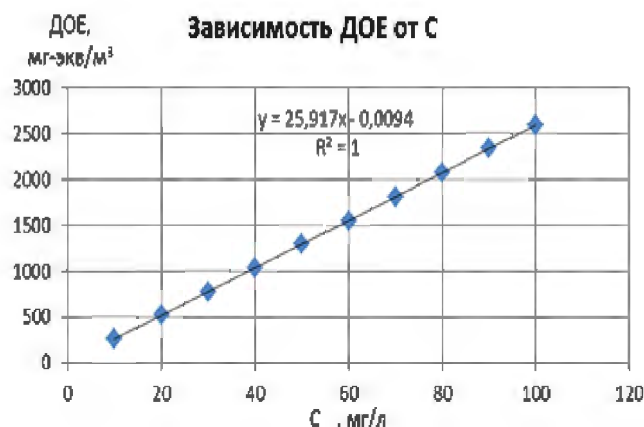


Рис. 3. Зависимость ДОЕ от концентрации ионов хлора в очищаемой среде.

Таким способом возможно определить предельные значения для современных аналогов ионообменных материалов.

Несмотря на разнообразие применяемых адсорбентов, многие из них не удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых к материалам подобного типа, в связи с чем поиск и разработка новых сорбционных материалов ведется постоянно [11].

Особо приоритетным является получение сравнительно дешевых сорбционных материалов на базе отходов промышленности, поскольку при этом отходы вторично используются [7-10]. Отходы производства в качестве адсорбентов лишены главного недостатка большинства применяемых адсорбентов, особенно ионооб-

менных смол, – высокой стоимости.

Плохо очищенные сточные воды поступают в природные водоемы, где тяжелые металлы накапливаются в воде и донных отложениях, становясь таким образом источником вторичного загрязнения.

Соединения тяжелых металлов сравнительно быстро распространяются по объему водного объекта [12]. Частично они выпадают в осадок в виде карбонатов, сульфатов, частично адсорбируются на минеральных и органических осадках. Вследствие чего содержание тяжелых металлов в отложениях постоянно увеличивается, и когда адсорбционная способность осадков исчерпывается, тяжелые металлы поступают в воду, что и приводит к экологическому кризису [13-15].

### Выводы

1. Определены граничные значения концентраций ионов меди и хлора в очищаемой среде для ионообменных материалов АВ-17-8 и КУ-2-8.
2. Найдены зависимости динамической обменной емкости в диапазоне концентраций для исследуемых ионитов.
3. В целом отмечено, что значение ионообменной сорбции на КУ-2-8 выше, а необменного поглощения ниже, чем на АВ-17-8. Рассчитаны равновесные характеристики сорбции по ионам меди и хлора высокоосновным анионообменником АВ-17-8 и сильнокислотным катионообменником КУ-2-8.

### Список литературы

1. Скороходов В.Ф., Месяц С.П., Остапенко С.П. Решение проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий от многокомпонентных загрязнений // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 106–108.
2. Lin L.-C., Juang R.-S. Ion-exchange kinetics of Cu(II) and Zn(II) from aqueous solutions with two chelating resins // Chem. Eng. J. 2007. V.132 P. 205-210.
3. Heavy metals in waste. Final Report // European Commission DG ENV E3. – Denmark, 2002. – February. – 86 p.
4. Рогова О.Б., Водяницкий Ю.Н. Сорбция цинка и меди в почвах зоны воздействия Череповецкого металлургического комплекса // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева РАСХН. – 2010. – № 6. – С. 64–74.
5. Сукрушев А.В., Браславский Ю.В. Водный режим контуров АЭС: учеб. пособие. – Севастополь: СТУЭЭиП, 2013. – 220 с.
6. 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.
7. 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.
8. 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 СТУЭЭиП, 2011. – С. 22.
9. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Кульченко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность. – 2013. – № 2 (16). – С. 89-92.
10. Пат. 78908 Украины, МПК51 В 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун-т ядерной энергии и промышленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
11. 11.Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Березин С.Е., Баженов В.И., Черненко А.В. Обоснование выбора технологического оборудования по очистке сточных вод // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2014. – № 2 (апрель) – С. 48-58.
13. Пономарёв В.Г. Выбор сооружений для очистки сточных вод от взвешенных загрязнений // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. – № 1 (февраль) – С. 45-52.
14. Данилович Д.А. Практика сравнения эффективности аэрационных систем // Наилучшие доступные технологии водоснабжения и водоотведения. – 2015. – № 4 (август) – С. 59-64.
15. Ярошевский А.Б., Гонголева А.А. Очистка медьсодержащих сточных вод гальванических производств щелочными сточными водами Актуальные проблемы социально-экономической и экологической безопасности Поволжского региона сборник материалов VIII международной научно-практической конференции. 2016. С. 85-88.

## References

1. Skorokhodov V. F., Mesyats S. P., Ostapenko S. P. solution to the problem of wastewater treatment of industrial enterprises from multi-component of pollution // *Mining journal.* – 2010. – № 9. – С. 106–108.
2. Lin L-C., Juang R-S. Ion-exchange kinetics of Cu(II) and Zn(II) from aqueous solutions with two chelating resins // *Chem. Eng. J.* 2007. V.132 P. 205-210.
3. Heavy metals in waste. Final Report // European Commission DG ENV E3. – Denmark, 2002. – February. – 86 p.
4. Rogova O. B., Vodyanitskii, Yu. N. Sorption of zinc and copper in soils of the impact zone of Cherepovets metallurgical complex // *Bulletin of Soil-governmental Institute.* V. V. Dokuchaev. – 2010. – № 6. – С. 64–74.
5. Sucrose A. V., Braslavsky J. V. Water circuits of nuclear power plants: proc. allowance. – Sevastopol: SNUEI, 2013. – 220 c.
6. 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.
7. Cherkashina N.I., Vedisheva V.A. Issledovanie effektivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenij radionuclidov iz tekhnologicheskij 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.
8. Cherkashina N.I. Tekhnologija polychenij 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.
9. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A., Kulenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pere-rabotki rastitelnogo sirjz pri ochistke stochnix vod I tekhnologicheskix 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.
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. Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // *The Open Colloid Science Journal.* – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Berezin S. E., Bazhenov V. I., Chernenko V. A. the Rationale for the selection of technological equipment for sewage treatment / Best available technologies of water supply and sanitation. – 2014. - № 2 (April) – P. 48-58.
13. Ponomarev, V. G. the Choice of structures for sewage treatment from suspended contaminants // the Best available technology of water and wastewater. – 2015. - № 1 (February) – P. 45-52.
14. Danilovich D. A., the Practice of comparing the efficiency of the aeration systems // Best available technology of water and wastewater. – 2015. - №. 4 (August) – P. 59-64.
15. Yaroshevskii, A. B., Gogoleva A. A. Purification of copper-containing wastewater electroplating alkaline wastewater Actual problems of socio-economic and ecological safety of the Volga region the collection of materials of VIII international scientific-practical conference. 2016. P. 85-88.

УДК 543.544-414

## РАЗРАБОТКА ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОМБИНАЦИЙ СОРБЦИОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ СИСТЕМЫ СВО-5

Н.И. Черкашина<sup>1</sup>, А.О. Литвинова<sup>2</sup>ФГАУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,  
г. Севастополь, 299053, Россия<sup>1</sup>Selyanskij-AS@yandex.ru, <sup>2</sup>oleksandra.litvinova@mail.ru

Статья поступила 31.09.2017 г.; после доработки 09.11.2017 г.

### Аннотация

Предложено математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, зависимость динамической обменной емкости представлена в программе Delphi7 на примере системы СВО-5. Приведены теоретические и экспериментальные данные по конкурентной сорбции катионов металлов  $\text{Cu}^{2+}$ , анионов  $\text{Cl}^-$ , на коммерчески доступных ионообменных сорбентах на примере анионитов и катионитов.

**Ключевые слова:** математическое описание, фильтрация, граничные условия, ионообменные материалы, сорбция, обменная емкость, система СВО-5, насыпная масса сорбента.

## THE DEVELOPMENT OF PROMISING COMBINATIONS OF SORPTION OF MIXTURES FOR THE SYSTEM OF SWO-5

N.I. Cherkashina<sup>1</sup>, A. O. Litvinova<sup>2</sup>

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.

<sup>1</sup>Selyanskij-AS@yandex.ru, <sup>2</sup>oleksandra.litvinova@mail.ru

Received 31.09.2017 y.; received in final form 09.11.2017 y.

### Abstract

The mathematical description of the filtering process, boundary conditions, the dependence of the dynamic exchange capacity presented in the program Delphi7 case of a system of SWC-5. Theoretical and experimental data for competitive adsorption of metal cations  $\text{Cu}^{2+}$ , anions  $\text{Cl}^-$ , commercially available ion-exchange sorbents for example, the anion exchange resin and cation exchange resin.

**Keywords:** mathematical description, filtering, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, water cooling system SWC-5, bulk weight of the sorbent

### Введение

Концентрации примесей в сточных водах различны: воды от охлаждения продуктов и аппаратуры практически не загрязнены, а воды от технологических процессов содержат загрязняющие вещества в больших количествах [1].

Для очистки сточных вод от ионов металлов (цинка, свинца, меди, хрома, никеля, кадмия, ванадия, марганца), а также соединений мышьяка, фосфора, цианистых соединений и

радиоактивных веществ применяют ионный обмен. Этот процесс протекает на ионитах, представляющих собой твердые полиэлектролиты, у которых ионы одного знака заряда закреплены на твердой матрице, а ионы противоположного знака заряда способны переходить в раствор и заменяться на другие ионы того же знака. Иониты состоят из полимеров, имеющих функциональные группы, которые способны диссоциировать в растворе.

В зависимости от того, какие ионы перехо-

дят в раствор, иониты разделяются на катиониты и аниониты.

Для очистки сточных вод, содержащих тяжелые металлы, основными физико-химическими методами считаются реагентные, мембранные, электрохимические, биохимические и сорбционные методы [2]. Сорбционное извлечение металлов из сточных вод получило достаточно широкое распространение вследствие высокой эффективности и отсутствия вторичных загрязнений.

Сорбционные материалы поглощают из водных растворов металлы практически до любых остаточных концентраций [3-4].

Несмотря на разнообразие применяемых адсорбентов, многие из них не удовлетворяют всему комплексу требований, предъявляемых к материалам подобного типа, в связи с чем поиск и разработка новых сорбционных материалов ведется постоянно.

В данной работе рассматривались механические, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5 [5].

Система СВО-5 состоит из двух основных и одной резервной ниток для двух блоков АЭС (но могут быть и другие варианты). Производительность одной нитки составляет примерно  $40...50 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Каждая основная нитка состоит из механического, катионитового, анионитового фильтров, ловушки зернистых материалов, бака очищенной воды и насосов бака очищенной воды. Резервная нитка включает в себя механический, катионитовый, анионитовый фильтры и ловушку зернистых материалов.

Математическое описание процесса фильтрации, граничные условия, рассчитанный коэффициент фильтрации представлен в программе Delphi7 на примере системы СВО-5.

В данной работе был исследован ряд сорбционно-активных материалов:

1) аниониты - АВ-17-8, АВ-17П, Амберлит IRA-458, Вофатит SBW, Варион АТ-660, Дауэкс SBR-(P), Дауэкс MSA-1, Смола Purolite A-860, Тульсион А-72(МП);

2) КУ-2-8, КУ-23, Амберлит IR-120, Тульсион Т-42, Смола DOWEX HCR-S/S, Сорбент АС, АНКБ-35, «Фолиоокс-КГО» сорбционные характеристики изучены [6-10].

Эти сорбенты можно использовать для очистки или доочистки сточных вод различных промышленных предприятий, обезвреживания газовых выбросов, ликвидации разливов нефти и других химических продуктов в настоящее время их производят в основном из углей раз-

личных марок, торфа и древесного угля.

В ряде стран разработаны методы получения более дешевых сорбентов из различных отходов, запасы которых ежегодно пополняются, а квалифицированное использование их не превышает 15...20 %.

Эти сорбенты отличают наличием химически активных групп, способны взаимодействовать с находящимися в растворе ионами металлов с образованием хелатных комплексов.

Такие группы можно ввести в полимерную матрицу путем химических превращений.

Из литературных источников известно, что гранульные хелатообразующие сорбенты обладают высокой селективностью по отношению к ионам тяжелых металлов, хорошо сорбируют золото, осмий, иридий, рутений, платину из растворов [11-12].

Катионит КУ-2-8 – это сильноокислотный катионит гелиевой структуры, активная группа – сульфогруппа.

Размер зерен –  $0,315...1,25 \text{ мм}$ , полная статическая обменная емкость –  $1,8 \text{ мг-моль/см}^3$ , динамическая емкость –  $526 \text{ г-моль/м}^3$ . Регенерацию производят раствором HCl или  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Применяют для разделения и удаления цветных и редких металлов в гидрометаллургии, при очистке оборотных и сточных вод, для регенерации отходов гальванотехники и металлообработки и др.

Анионит АВ-17-8 – это сильноосновный анионит, активная группа – четвертичные триметиламмониевые группы. Размер зерен –  $0,315...1,25 \text{ мм}$ . Применяется в гидрометаллургии, для очистки сточных и оборотных вод, в водоподготовке, химической промышленности и др.

Рассмотрена возможность сорбционного концентрирования ионов Cu(II), Ni(II), Zn(II), Cd(II), Fe(III) полиамфолитом АНКБ-35 в широком диапазоне pH равновесного раствора, концентраций металлов, скорости потока [13].

Для ионита Фолиоокс-КГО установлен ряд селективности металлов при pH раствора 2...5. Найдены оптимальные условия сорбции и десорбции ионов, показано влияние природы и концентрации кислоты на эффективность извлечения ионов тяжелых металлов из ионита Фолиоокс-КГО (аминокарбоксильный).

Проведено сопоставление значений подвижности  $\text{Cu}^{2+}$ , рассчитанных из удельной электропроводности и миграционного потока в ионообменных материалах различной природы – как промышленно выпускаемых органических, так и неорганических, на основе амфорно-

го фосфата циркония [6-10].

Для большинства материалов подвижность составляет  $1,0 - 1,5 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$ .

Указанные преимущества достигаются благодаря принципиально новому подходу к организации всего процесса и применению новых материалов.

Основной недостаток всех существующих методов – сложность утилизации осадков вследствие их многокомпонентности и переменного состава.

Эксплуатационные и экономические недостатки сорбционного метода очистки природных и сточных вод традиционными адсорбентами устраняются при использовании адсорбента, обладающего высокой поверхностной активностью зерен, позволяющего восстанавливать сорбционную способность посредством технологически несложной, непродолжительной по времени регенерации, проводимой непосредственно в фильтровальном сооружении наиболее эффективной основой для получения адсорбентов с целенаправленно регулируемые свойствами могут служить алюмосиликатные минералы, так как в их структуру можно вводить практически любые добавки органического и минерального происхождения, которые будут придавать поверхности зерен требуемые свойства.

Цель данной работы – проверка математического моделирования системы, основанной на применении сорбентов, обладающих высокими избирательными и емкостными характеристиками по отношению к различным формам металлов, буферными свойствами, осмотической устойчивостью, способностью достаточно полно регенерироваться, и сменных фильтров, конструкция которых обеспечит высокую пропускную способность и простоту эксплуатации, а также создание замкнутой технологической схемы процесса регенерации сорбентов.

### Эксперимент

Для приготовления всех растворов использовались реактивы качества не ниже ч.д.а. и бидистиллированная вода.

Необходимую для экспериментов величину pH получали добавлением азотной кислоты.

Перед проведением экспериментов все ионообменные материалы промывали раствором хлорида натрия (10 г/л), а затем бидистиллированной водой до нейтральной величины pH смыва.

Концентрация ионов меди и хлора в рабо-

чем растворе составляют:  $C_{Cu}=50-250 \text{ мг/л}$ ;  $C_{Cl}=10-100 \text{ мг/л}$ .

В диапазоне концентраций получены значения динамической обменной емкости (ДОЕ) для современных ионитов приведены на рисунках 1 и 2.



Рис. 1. Зависимость ДОЕ от насыпной массы катионита.

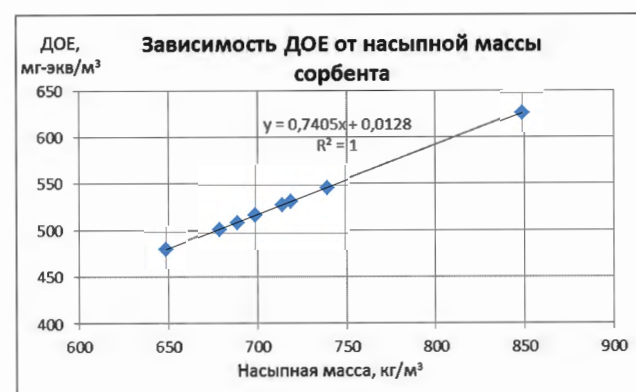


Рис. 2. Зависимость ДОЕ от насыпной массы анионита.

Используя математическое описание процесса фильтрации представленное в программе Delphi7 можно выбрать оптимальные сорбционные материалы, их возможные комбинации для реализации различных задач при сорбционной очистке сточных вод.

В данной работе рассматривались механические, ионообменные фильтры на примере системы СВО-5.

Используются на первой стадии ионирования катионит в + Н форме, а на второй стадии анионит в – ОН форме, который обеспечивает высокую эффективность извлечения хлоридов на анионите АВ-17-8.

Примеры рабочих окон для получения экспериментальных точек представлены на рис. 3 и 4.

Анионитовый фильтр

Насыпная масса сорбента      Масса загрузки

кг/м<sup>3</sup>       кг

$V_f$   м<sup>3</sup>       $Z$

Сэл-та  мг/л

Расчет ДОЕ  мг-экв/м<sup>3</sup>

**Рис. 3.** Рабочее окно в программе Delphi7 для получения зависимости ДОЕ от насыпной массы анионита.

Катионитовый фильтр

Насыпная масса сорбента      Масса загрузки

кг/м<sup>3</sup>       кг

$V_f$   м<sup>3</sup>       $Z$

Сэл-та  мг/л

Расчет ДОЕ  мг-экв/м<sup>3</sup>

**Рис. 4.** Рабочее окно в программе Delphi7 для получения зависимости ДОЕ от насыпной массы катионита.

Таким способом возможно определить предельные значения для современных аналогов ионообменных материалов, результаты представлены в табл. 1 и 2.

**Таблица 1.**

| Марка катионита  | Насыпная масса, кг/м <sup>3</sup> | Динамическая обменная емкость, мг-экв/м <sup>3</sup> |
|------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| АВ-17-8          | 700                               | 518,33                                               |
| АВ-17П           | 850                               | 629,4                                                |
| Амберлит IRA-458 | 720                               | 533,14                                               |
| Вофатит SBW      | 700                               | 518,33                                               |
| Варион АТ-660    | 740                               | 547,95                                               |
| Дауэкс SBR-(P)   | 650                               | 481,31                                               |
| Дауэкс MSA-1     | 680                               | 503,52                                               |

|                      |     |        |
|----------------------|-----|--------|
| Смола Purolite A-860 | 715 | 529,44 |
| Тульсион А-72(МП)    | 690 | 510,93 |

**Таблица. 2**

| Марка катионита     | Насыпная масса, кг/м <sup>3</sup> | Динамическая обменная емкость, мг-экв/м <sup>3</sup> |
|---------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------|
| КУ-2-8              | 820                               | 516,11                                               |
| КУ-23               | 700                               | 440,58                                               |
| Амберлит IR-120     | 800                               | 503,52                                               |
| Тульсион Т-42       | 850                               | 535                                                  |
| Смола DOWEX HCR-S/S | 840                               | 528,7                                                |
| Сорбент АС          | 670                               | 421,7                                                |

Показано, что в условиях, приближенных к условиям очистки сточных вод, в области максимальных концентраций, большей избирательностью к ионам меди(II), обладают материалы: Смола DOWEX, Тульсион Т-42.

В области высоких концентраций, условно соответствующих концентрациям ионов хлора в сточных водах промышленных предприятий, максимальной конкурентной емкостью по ионам хлора обладали материалы: Варион АТ-660, Амберлит IRA-458, Смола Purolite А-860.

Увеличение масштабов применения природных сорбентов обусловлено тем, что при развитой удельной поверхности они обладают хорошими сорбирующими свойствами и в десятки раз дешевле синтетических. В связи с этим упрощается их технологическое применение, часто исключается стадия регенерации.

В процессе исследований было установлено, что использование смеси (табл. 1-2) ионитов способствует повышению эффективности сорбционной очистки растворов от ионов металлов, причем оптимальные состав и степень протонирования смеси определяются как типом, так и формой присутствия металла в растворе, а также и кислотностью последнего. Особого внимания заслуживает факт высокого сродства смеси, содержащей 75 % катионита и 25 % анионита.

При использовании смеси наблюдается повышение емкости индивидуальных ионитов по отношению к ионам металлов, которое объясняется созданием условий для максимальной реализации их емкостных свойств.

К существенным достоинствам применения смеси ионитов следует отнести также стабили-

зацию кислотности обрабатываемой воды на уровне pH 7...7,5 и незначительное изменение удельного объема (не более 7 %) при регенерации и переводе в рабочую форму.

### Выводы

- 1) Для выбранных ионообменных материалов экспериментально получены значения некоторых ионообменных характеристик высоких концентраций ионов меди и хлора. Полученные данные использованы при разработке перспективных комбинаций сорбционных смесей для системы СВО-5.
- 2) Найден зависимости динамической обменной емкости в диапазоне концентраций для исследуемых ионитов.

### Список литературы

1. Скороходов В.Ф., Месяц С.П., Остапенко С.П. Решение проблемы очистки сточных вод промышленных предприятий от многокомпонентных загрязнений // Горный журнал. – 2010. – № 9. – С. 106–108.
2. Алыков Н.М., Павлова А.В., Нгуэн Кхань Зуй. Сорбционное удаление из воды ионов тяжелых металлов // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 4. – С. 17–20.
3. Солуковцева Т.В., Лысенко А.В. Разработка способа очистки сточных вод от ионов меди отходами свеклосахарного производства // Сборник научных трудов 4-й Международной молодежной научной конференции. В 2-х томах. Ответственный редактор А.А. Горехов. 2017. С. 68-71.
4. Дремичева Е.С., Лаптев А.Г. Моделирование сорбционного метода очистки сточных вод от нефтепродуктов и тяжелых металлов // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2017. Т. 6. С. 81-85.
5. Сукрушев А.В., Браславский Ю.В. Водный режим контуров АЭС: учеб. пособие. – Севастополь: СТУЭЭП, 2013. – 220 с.
6. 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.
7. 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.
8. 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 СТУЭЭП, 2011. – С. 22.
9. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Кульченко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность. – 2013. – № 2 (16). – С. 89-92.
10. Пат. 78908 Украины, МПК51 В 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун-т ядерной энергии и промышленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
11. Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
12. Долина Л.Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжелых металлов: Монография. – Дн-вск.: Континент, 2008. 254 с.
13. Подвижность  $\text{Cu}^{2+}$  в различных ионообменных материалах. Мальцева Т.В., Василюк С.Л. и др. // ХИТВ. – 2004, т. 26, №5, с. 450-457.

### References

1. Skorokhodov V. F., Mesyats S. P., Ostapenko S. P. solution to the problem of wastewater treatment of industrial enterprises from multi-component of pollution // Mining journal.. – 2010. – № 9. – С. 106–108.
2. Alykov N. M. Pavlov, A. V., Nguyen Khanh Duy. Sorption removal of water from heavy metal ions // life Safety. – 2010. – No. 4. – P. 17-20.
3. Salakavala T. V., Lysenko A. V. Development of the method of sewage treatment from ions of the me-Dee waste of sugar beet production // Collection of scientific papers 4-th International youth scientific conference. In 2 volumes. Executive editor A. A. Gorokhov. 2017. P. 68-71.
4. Demicheva E. S., Laptev A. G. Modeling sorption method of purification of sewage from oil products and heavy metals // Mathematical methods in technics and technologies - mmtt. 2017. Vol. 6. P.81-85.
5. Sucrose A. V., Braslavsky J. V. Water circuits of nuclear power plants: proc. allowance. – Sevastopol: SNUEI, 2013. – 220 с.
6. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistka stochnix vod ot ionov metallo 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.
7. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanie effektivnosti sorbcionnix materialov dlja izvlechenijz radionuclidov iz texnologicheskij sred [The study of effective sorption materials for extraction of radionuclides of technological environments Materials of scientific-practical conference "Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety" (15 – 18 June 2016, Sevastopol). – Sevastopol: SevGU, 2016. – 356 p.
  8. Cherkashina N.I. Texnologija polychenijz sorbcionnix materialov na osnove lignina dlja ytilizacii jidkih radioaktivnix otxodov [The technology of obtaining sorption materials based on lignin for utilization of LRW] The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences – Sevastopol: publishing house SNUNE and industry 2011. – P. 22.
  9. Cherkashina N.I., Erofeev V.A., Kultenko E.A. ispolzovanie sorbentov na osnove othodov pere-rabotki 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.
  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. Guixia Zhao, Xilin Wu, Xiaoli Tan, Xiangke Wang. Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review // The Open Colloid Science Journal. – 2011. – № 4. – P.19–31.
  12. Dolina L. F. Modern equipment and technologies for wastewater treatment from salts of heavy metals. – Dnepropetrovsk .: The continent 2008. 254 p.
  13. The mobility of  $\text{Cu}^{2+}$  in different ion-exchange materials. Maltseva T. V., Vasilyuk S. L., etc. //HandTV. – 2004, T. 26, №5, P.

УДК 662.6:543.812

## Методы определения водосодержания в нефти и нефтепродуктах, остаточного содержания нефтепродуктов в воде

И.Б. Широков<sup>1</sup>, И.И. Марончук<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, shirokov@ieee.org

<sup>2</sup>ООО «Генезис-Таврида», ул. Щербака, 5, г. Севастополь, 299011, Россия, igimar@mail.ru

Статья поступила 14.11.2017 г.; после доработки 17.11.2017 г.

---

### Аннотация

В настоящей статье рассматривается проблема, связанная с адекватным определением содержания воды в нефти и нефтепродуктах, а так же остаточным содержанием нефтепродуктов в воде для их экологического анализа. Рассмотрены основные методы измерений обозначенной проблемы, которые используются в современных измерительных приборах нефтяной отрасли и экологического контроля. Представлена классификация и краткая оценка преимуществ и недостатков этих методов. Обозначена посвященная им нормативная база.

**Ключевые слова:** нефть, нефтепродукты, вода, влагомер, методы измерений, водонефтяная эмульсия

---

## Methods for determining water content in oil and petroleum products, residual content of oil products in water

I. B. Shirokov<sup>1</sup>, I. I. Maronchuk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>FSAEE HE "Sevastopol State University," Universitetskaya St., 33, Sevastopol 299053, Russia, shirokov@ieee.org

<sup>2</sup>Genesis-Tavrida Ltd., Scherbak St., 5, Sevastopol, 299011, Russia, igimar@mail.ru

Received 14.11.2017 y.; received in final form 17.11.2017 y.

---

### Abstract

In this article, the problem related to the adequate determination of the water content in oil and petroleum products, as well as the residual content of petroleum products in water for their ecological analysis is considered. The main methods of measuring the indicated problem are considered, which are used in modern measuring instruments of the oil industry and environmental control. A classification and a brief evaluation of the advantages and disadvantages of these methods are presented. The normative base devoted to them is marked.

**Key words:** oil, oil products, water, moisture meter, measurement methods, water-oil emulsion

---

### Введение

В настоящее время нефтяная отрасль является приоритетной для развития всей мировой экономики. По объему и добыче нефти Россия занимает одно из лидирующих мест в мире, являясь нефтедобывающим, перерабатывающим, потребляющим и экспортирующим нефть государством. При этом зависимость экономики страны от нефтяного сектора довольно-таки высока.

Добываемая «сырая» нефть представляет

собой многокомпонентную смесь, состоящую из нефти, газа и воды, причем уровень наличия воды, в старых месторождениях, может достигать до 90%. Наличие достоверной информации о содержании нефти и воды в добываемой продукции позволяет судить об эффективности и рентабельности разработки и эксплуатации скважины. Кроме того, на добычу воды в составе нефти, на её отделение и утилизацию затрачиваются значительные средства.

Основными нефтепродуктами, получаемыми из добываемой нефти, являются автомобиль-

ные бензины, дизельное топливо и моторные масла. В процессе транспортирования, приема, хранения и выдачи которых происходит их интенсивное обводнение и загрязнение с последующим ухудшением качества.

Необходимостью ограничения содержания воды в нефти и нефтепродуктах является то, что:

- вода вместе с нефтью образует высоковязкие эмульсии, перекачка которых на достаточно большие расстояния приводит к дополнительным энергетическим затратам;
- транспортирование пластовой воды вместе с нефтью нерационально, так как вода не имеет товарной ценности;
- уменьшается эффективность и надёжность работы магистрального трубопроводного транспорта, снижается их пропускная способность и повышается опасность прорыва, увеличивая капитальные и эксплуатационные затраты;
- вода в нефти в условиях низких температур кристаллизуется, это затрудняет перекачку нефти в связи с забивкой фильтров и поломкой насосов;
- пластовая вода, содержащаяся в нефти, представляет собой растворы солей, тем самым способствуя более интенсивному коррозионному износу насосного оборудования, закупорку теплообменной и нефтеперегонной аппаратуры;
- ухудшается качество получаемых из нефти нефтепродуктов;
- вода отрицательно влияет на эксплуатационные свойства нефтепродуктов, ухудшая низкотемпературные, энергетические, коррозионные, смазывающие и износостойкие свойства;
- в светлых нефтепродуктах вода способствует образованию загрязнений с развитием микроорганизмов и увеличением электризации;
- вода отрицательно влияет на работу топливных систем и двигателей в целом, на работу машин и механизмов, где нефтепродукты являются рабочими средами.

Вода является природным спутником нефти при ее добыче. В нефти вода может содержаться в виде свободной воды и легко отстаиваться при хранении, либо в виде эмульсии. В этом случае капли (глобулы) воды диспергированы в нефти и защищены оболочкой из смолисто-асфальтеновых веществ, солей карбоновых кислот, механических примесей, которые препятствуют сливанию глобул воды и ее отделению от нефти [1].

В нефтепродуктах вода находится в растворенном (суспензированная и эмульсионная вода) и свободном состояниях. Ее концентрация, как правило, очень мала, за исключением случаев обводнения. С изменением физического состояния окружающей среды растворимость воды в нефтепродукте меняется. При насыщении растворенная вода выпадает в виде мельчайших капель, которые укрупняются и оседают на дно резервуара с нефтепродуктом, образуя подтоварную свободную воду. При недостатке растворенной воды влага из атмосферы, частично свободная вода в виде мельчайших капель и подтоварная вода переходят в нефтепродукт. В загрязненных нефтепродуктах, вода может находиться в связанном состоянии. На наличие воды в смазочных маслах указывает их мутность.

Свободная вода образуется также при контакте с влажным теплым воздухом, конденсируясь на поверхности холодного нефтепродукта и резервуара. На стенки резервуаров влага из воздуха может так же попадать в виде инея.

История именно коммерческого учета добываемой в России нефти насчитывает около 25 лет, так как в СССР недровладелец и недропользователь имели государственную форму собственности [2]. В то время основное внимание уделялось учету товарной нефти, прошедшей стадии обезвоживания, обессоливания и стабилизации, соответствующей ГОСТ 9965-76. Для учета применялись средства измерений расхода, количества и показателей качества, устанавливаемые на станциях и пунктах учета нефти. Для определения содержания воды первоначально применялся только лабораторный метод (ГОСТ 2477-65), позднее получили широкое распространение поточные влагомеры, позволяющие более оперативно получать информацию о содержании воды в нефти [1].

В настоящее время со стороны государства усилился контроль над добычей углеводородного сырья. Стало необходимым наличие достоверных измерений количества извлеченных углеводородов из каждой отдельно взятой скважины [3]. Однако, использовать имеющуюся в СССР методологию метрологического обеспечения учета товарной нефти не предоставлялось возможным, что связано с кардинальным отличием ее свойств от продукта получаемого из скважин сегодня [4].

К настоящему времени подготовлена законодательная база: Федеральный закон РФ «О недрах», «Об энергосбережении», «Об обеспечении единства измерений» и др., которая обязывает юридические лица вести учет добываемо-

го сырья, с целью составления государственных балансов его запаса и адекватного налогообложения [5]. Разработан и введен в действие ГОСТ 8.615-2005. В нем, впервые в отечественной практике, сформулированы требования к точности измерения количества добываемой сырой нефти и попутного нефтяного газа [6].

Учитывая современные тенденции, диапазон измерений объемного содержания воды в нефти и ее продуктах вырос до 100%, а это требует разработки современных приборов, на основе новых более точных методов определения объемного влагосодержания.

Кроме того, нефтяной комплекс негативно воздействует на окружающую среду, не являясь безопасным производством. Нефть является одним из основных загрязнителей окружающей нас природы. По экспертным оценкам на нефтепромыслах теряется до 3,5% от общего объема добываемой нефти, причем до 20% из этого объема веществ попадают в водные источники, загрязняя в частности поверхностные и грунтовые воды [7]. В России в нормативных документах [8] принят обобщенный «загрязняющий» показатель нефтепродуктов. Предельно допустимая концентрация (ПДК) для нефтепродуктов установлена к: питьевой воде —  $0,1 \text{ мг/дм}^3$ , воде рыбохозяйственного назначения —  $0,05 \text{ мг/дм}^3$ .

Стандарт ГОСТ 17.1.4.01-80 [9] устанавливает общие требования к методам определения растворенных, эмульгированных и пленочных нефтепродуктов в природных водах, включая воды суши, морские и подземные, и в сточных водах. Нефтепродукты по данному стандарту определяются как неполярные и малополярные углеводороды (алифатические, ароматические, алициклические), составляющие главную и наиболее характерную часть нефти и продуктов ее переработки. В международной практике содержание в воде нефтепродуктов определяется термином «углеводородный нефтяной индекс» (hydrocarbon oil index).

### Постановка задачи

Как видно из введения, проблема, связанная с адекватным определением количества обводненности нефти и нефтепродуктов, а также экологический контроль содержания нефтепродуктов в воде, является весьма актуальной задачей. Несмотря на огромное количество присутствующих на рынке современных влагомеров, работающих в широком диапазоне, а так же приборов определяющих остаточное содержание нефти в воде и публикаций посвященных их

описанию, авторы, к своему удивлению, были поражены отсутствием необходимой обзорной информации посвященной методам, на которых основано их функционирование. Целью работы являлась подготовка обзорной статьи, посвященной краткому описанию основных методов измерения содержания воды в нефти и нефтепродуктах, а также обнаружения нефтепродуктов в воде, которые используются в современных измерительных приборах нефтяной отрасли. В статье приводится также краткая оценка преимуществ и недостатков этих методов и посвященная им нормативная база.

### Основная часть

Исходя из вышесказанного контроль над содержанием воды в нефти и, наоборот, с целью адекватной реакции на ликвидацию вышеперечисленных негативных факторов является весьма актуальным.

Различают качественные и количественные методы определения воды в нефти и нефтепродуктах, а также определения нефтепродуктов в водных образцах. К качественным относятся те, которые позволяют определить только наличие или отсутствие воды в нефти или нефтепродуктах.

Количественные методы измерения объемного содержания воды в нефти и нефтепродуктах можно разделить по следующему принципу:

- периодические (лабораторные) измерения;
- непрерывные (проточные) измерения при проведении технологических процессов на предприятиях и контроле нефти при добыче и транспортировке.

К периодическим (лабораторным) методам относятся (следующие основные методы):

- измерения по ГОСТ 2477-65 «Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды»;
- измерения посредством титратора по методу Карла Фишера;
- измерения посредством лабораторного влагомера;
- измерения газометрическим методом;
- измерения методом центрифугирования;
- измерение методом экспресс—анализа;
- измерения диэлектрическим методом;
- измерения лабораторными методами экологического анализа;
- измерения методом перегрева жидкостей на поверхности проволочного зонда и др.

Для технологических процессов на всех этапах добычи, транспортировки и подготовки углеводородного сырья важным является непре-

рывность измерения, при этом, в настоящее время, используют поточные влагомеры работающие, как правило, в автоматическом режиме. Сейчас существуют влагомеры с диапазоном измерений объемного содержания воды  $0 \div 100\%$ , основанные на новых принципах работ, рассматриваемых нами в данной работе. Использование поточных влагомеров в системе добычи, сбора и транспортировки нефти обусловлено необходимостью определения количества (массы) сырой нефти в соответствии с ГОСТ Р 8.615-2005 и массы товарной нефти в соответствии с

ГОСТ Р 8.595-2004 [10, 11].

Методы, на которых базируется работа различных современных поточных средств измерений объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов основаны на различном поведении воды и нефти в физических полях (электрическом, магнитном и т. д.), на их физико-химических свойствах. Классификацию методов, согласно проведенному ниже обзору литературы [1—41] можно представить на рис. 1.



**Рис. 1.** Классификация методов определения содержания воды в нефти, нефтепродуктах и нефтепродуктов в воде.

Существующие количественные методы определения воды в жидких продуктах, кроме того (по другой классификации), делят на: прямые и косвенные. К прямым методам относят: метод Дина и Старка, титрование реактивом Карла Фишера, гидридкальциевый метод и центрифугирование. К косвенным методам отно-

сят: оптические методы, диэлектрические и др.

Ниже, кратко рассмотрим суть каждого из вышеперечисленных методов.

#### Качественные методы испытаний

Рассмотрим качественные методы испытаний, которые позволяют определить лишь

наличие или отсутствие воды в пробе [12].

*Проба Клиффорда.* Суть метода состоит в том, что испытуемый продукт встряхивают в делительной воронке с добавлением порошка марганцево-кислого калия. При наличии влаги кратковременно образуется слабо-розовая окраска.

*Проба на прозрачность.* Заключается в том, что образец нефтепродукта, помещенный в пробирку с термометром, охлаждают, после чего определяют степень помутнения пробы на рассеянном свете. Помутнение или легкое потускнение пробы свидетельствует о наличии влаги. Метод применяется в основном для светлых смазочных масел и дизельных топлив.

*Проба на потрескивание.* Заключается в том, что пробу нефти или нефтепродукта, помещенную в стеклянную пробирку, нагревают. При наличии в пробе влаги она начинает пениться, слышится треск, пробирка вздрагивает, а капли продукта на стенках верхней части мутнеют. Этот метод до настоящего времени применяется при определении наличия воды в нефтяных маслах и пластичных смазках в соответствии с ГОСТ 1547-84 [13].

На современном этапе развития техники и технологии качественные методы определения содержания воды применяются лишь для демонстрационных целей, в техническом анализе используют количественные методы.

### Количественные методы испытаний

#### *Лабораторные методы.*

К лабораторным методам измерения объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов относятся перегонка с растворителями, а для определения малых количеств воды используют методы титрования продуктов взаимодействия с водой [14].

*Метод Дина и Старка.* Метод перегонки нефтепродукта с растворителем, более известный как метод Дина и Старка, реализуется в соответствии с ГОСТ 2477-65 «Нефть и нефтепродукты» [15], используют в России как арбитражный.

Сущность метода состоит в нагревании пробы нефтепродукта с нерастворимым в воде растворителем и измерении объема сконденсированной воды. В качестве растворителя используют либо нефтяной дистиллят с  $100\div 200^{\circ}\text{C}$ , либо толуол или ксилол с пределами кипения  $100\div 140^{\circ}\text{C}$ . Растворитель увеличивает летучесть воды образуя с ней нераздельно кипящую смесь. После конденсации смесь раз-

деляется на фазу растворителя и водную фазу, которая скапливается в нижней части приемника. Метод позволяет определить массовую или объемную долю воды в процентах.

Объектами измерений по ГОСТ 2477-65 являются [16]: товарная нефть с диапазоном измерений содержания воды  $0\div 1\%$ ; сырая нефть с диапазоном измерений содержания воды  $0\div 85\%$ ; нефтегазовая смесь с диапазоном измерений содержания воды  $0\div 98\%$ .

Недостатком метода является то, что применяясь при учетных операциях с нефтью, он, несмотря на простоту аппаратного оформления, отличается длительностью проведения анализа и большой погрешностью (до 30% отн.) по определению содержания воды, что вносит большую составляющую в погрешность определения массы (количества) нефти. Метод применим лишь для определения очень малых количеств воды.

*Метод Карла Фишера.* Более точным лабораторным методом определения содержания воды в нефтепродуктах является метод Карла Фишера. Его работа [17] была опубликована в 1935 году и с тех пор титрование по Карлу Фишеру развилось в широко применяемый аналитический метод [18]. Основой метода является реакция Бунзена между йодом, диоксидом серы и водой.

На первой стадии вода реагирует с диоксидом серы, в результате чего йод  $\text{I}_2$  восстанавливается до йод  $\text{I}^-$ . Выделяющийся триоксид серы образует с пиридином комплекс, который в присутствии метанола (или другого спирта) превращается в стабильный пиридиновый комплекс. Таким образом, для титрования каждого эквивалента воды затрачивается один эквивалент йода.

Метод Карла Фишера может быть реализован в двух вариантах: *волюметрическом* и *кулонометрическом*. Различием между этими методами является происхождение «активного ингридиента» — йода. В волюметрическом методе йод содержится в реагенте и подается в пробу через бюретку или систему дозирования при титровании. Конечная точка титрования в объеме индицируется путем подвода переменного тока постоянной величины к двум электродам из платины. Это приводит к появлению разности напряжений на проводах из платины электрода индикатора, которое существенно снижается в присутствии минимальных количеств свободного йода.

В кулонометрическом методе йод производится путем электролиза из иодид-ионов. Йод

попадает на анод, который затем вступает в реакцию с анализируемым веществом. Количество йода прямо пропорционально количеству электричества. Как уже было указано, по стехиометрии реакции 1 моль йода реагирует с 1 моль воды, а в сочетании с кулонометрией, 1 мг воды эквивалентен 10,71 кулон электроэнергии. Таким образом, количество воды в образце определяется путем измерения тока электролиза в кулонах.

Волюметрический метод, работающий в диапазоне от  $10^{-5}$  до 1 [19], лучше подходит для определения высоких значений содержания воды, кулонометрический метод более чувствителен и используется для определения низкого уровня содержания воды (в диапазоне 0,02÷5%) с абсолютной погрешностью  $\pm 3\%$  [18]. Кулонометрическое титрование по Карлу Фишеру регламентируется ГОСТ Р 54284-10.

Недостатком метода является то, что реактив Фишера малоустойчив и со временем теряет способность к реакции с водой. Кроме того, в «сырой» нефти содержатся вещества и классы соединений (например, меркаптаны и сульфиды), вступающие в окислительно-восстановительные или реакции конденсации, которые мешают определению воды методом Карла Фишера, снижая его точность. Также, для гомогенизации пробы нефти или нефтепродукта, используют специальные реактивы или дополнительные растворители, что затрудняет процесс измерения и ухудшает воспроизводимость результатов.

*Методы лабораторной влагометрии.* В настоящее время, в нефтяной промышленности активно используются лабораторные приборы для определения содержания воды в нефти.

В основе действия лабораторных влагомеров лежат косвенные методы измерения влагосодержания: *диэлькометрический метод определения влажности* (влагомер ВСН-Л, ВАД-40М), *метод микроволнового излучения* (влагомер УДВН-1л, эталонный влагомер ЭУДВН-1л). Подробнее рассмотрим данные методы ниже.

Среди представленных лабораторных влагомеров приборы УДВН-1л (диапазон измерений 0÷2,0%, абсолютная погрешность  $\pm 0,06\%$ ) и ЭУДВН-1л (диапазон измерений 0,03÷2,0%, абсолютная погрешность  $\pm 0,03\%$ ) применяются для определения характеристик товарной нефти [20]. Влагомер ВСН-Л (диапазон измерений 0,2÷99,0%, абсолютная погрешность от  $\pm 0,06\%$  до  $\pm 1,2\%$ ) предназначен для измерений объемного влагосодержания «сырой» нефти [21].

Преимуществом диэлькометрического ме-

тода, лабораторного исполнения, от вышеописанных лабораторных методов заключается в том, что определение содержания воды не требует использования специальных растворителей и реактивов, на точность метода не оказывает влияние наличие сернистых соединений в нефти, а возможность автоматизации процесса измерения сводит к минимуму человеческий фактор.

Несмотря на указанные преимущества, влагомер ВСН-Л имеет не высокую точность измерений, что не позволяет применять его при коммерческом учете добываемой нефти.

*Газометрический метод.* Относится к лабораторным, основан на химическом взаимодействии воды, присутствующей в нефти и нефтепродуктах, с реактивами (металлическими натрием, кальцием, гидридом кальция, реактивом Карла-Фишера) в результате которого выделяется водород.

Известен полевой газометрический метод, регламентированный международным стандартом ISO 9114.

Метод широко применяется при измерении содержания воды в «сырой» нефти в диапазоне 0,05÷2% в тех случаях, когда нет возможности использовать другие лабораторные методы. Сущность его заключается в том, что предварительно пробу гомогенизируют с помощью смесителя, затем переносят в реакционный сосуд, где вода реагирует, например, с гидридом кальция ( $\text{CaH}_2$ ) или со щелочными металлами (натрием, кальцием), далее измеряют объем выделяющегося водорода [22].

*Метод центрифугирования.* В некоторых случаях, при определении количества воды и осадка в сырой нефти, используют метод центрифугирования, регламентированного по ASTM D 96, D 91. Диапазон температур проведения процесса варьируется  $+5\div+70^\circ\text{C}$ . Время центрифугирования 1÷60 мин. Метод носит экспрессный характер и не обладает высокой чувствительностью.

*Диэлектрический метод.* Основой метода является измерение диэлектрической проницаемости обезвоженной и «сырой» нефти [23]. Согласно формуле Лихтенеккера-Ротера диэлектрическая проницаемость смеси, состоящей из двух компонентов — воды и нефти, зависит от их объемного соотношения:

$$\lg \epsilon_H = y_1 \lg \epsilon_e + y_2 \lg \epsilon_n.$$

Здесь  $y_1$  и  $y_2$  — объемные доли воды и нефти;  $\epsilon_e$  — диэлектрическая проницаемость воды;  $\epsilon_n$  — диэлектрическая проницаемость

обезвоженной нефти;  $\epsilon_H$  — диэлектрическая проницаемость (смеси) «сырой» нефти.

С учетом известного значения диэлектрической проницаемости воды  $\epsilon_e$  и выражения (указанного выше) процентное содержание воды определится по отношению:

$$W_{H_2O} = 52,7(\lg \epsilon_H - \lg \epsilon_e).$$

Таким образом, для определения процентного содержания воды достаточно измерить диэлектрическую проницаемость смеси  $\epsilon_H$  и обезвоженного продукта  $\epsilon_e$ .

Недостатком метода является отсутствие возможности определения воды в нефти и нефтепродукте в потоке трубопровода. Это связано с невозможностью определения суммарного содержания металлосодержащих микроэлементов, что делает невозможным идентификацию типа нефти по месторождению или смеси нефти и дает большую погрешность измерения при исследовании неизвестной нефти. Кроме того, метод хорош для определения малого содержания воды в нефти, его оформление описано в [23].

*Лабораторные методы экологического анализа.* Методы определения содержания нефтепродуктов в воде, используемые в экологическом анализе, как правило, основаны на различных физико-химических свойствах нефтепродуктов. К ним можно отнести: гравиметрический, ИК-спектрометрический, флуориметрический и хроматографический [7]. Любопытно то, что при определении нефтепродуктов в одном и том же образце воды они могут давать различие результаты измерений, это обусловлено сложным составом нефти и нефтепродуктов.

В России такие методы анализа регламентированы нормативными документами: ПНД Ф 14.1.2. 116-97; РД 52.10.243-92; ПНД Ф 14.1.2. 62-96; ПНД Ф 14.1.2.5-95; МУК 4.1.1013-01; ГОСТ 51797-2001; РД 52.24.476-2007; ПНД Ф 14.1.2. 129-98 [7,24].

Эти методики основаны на методах: гравиметрии, флуориметрии, ИК-спектрометрии. Они позволяют получить информацию о суммарном содержании неполярных и малополярных углеводородов нефти.

В случаях, когда необходима информация о качественном составе нефтепродуктов в образцах воды, применяют методики на основе газовой хроматографии: ГОСТ Р 52406-2005; МВИ-05-94 [7, 25].

Основным недостатком данных методик

является дороговизна оборудования, большие трудо- и время затраты, использование больших объемов органических растворителей.

Из перечисленных методик, методика ПНД Ф 14.1.2.129-98, основанная на флуориметрическом определении, наиболее оптимальна. Она является самой экспрессной (10 мин.), не нуждается в большом количестве растворителей (всего 15 мл). Однако не обеспечивает достаточной селективности определения и позволяет зарегистрировать лишь отклик алкилбензолных соединений, массовая доля которых в нефти составляет порядка 20%.

Диапазон определения нефтепродуктов составляет  $0,005 \div 50$  мг/л.

*Метод экспресс-анализа.* Метод предназначен для определения массовой концентрации нефтепродуктов в воде. Известен, как КИС-НП СЕ. 1207.00.00.000. «Лилия-1». Метод внесен в Государственный реестр средств измерения (РН 17572-98) и реестр аттестованных методик Федерального информационного фонда по обеспечению единства измерений (ФР.29.2006.02183). Измерение выполняется непосредственно в месте отбора проб воды. Диапазон измерений  $0,05 \div 50$  мг/дм<sup>3</sup> от наличия нефтепродукта, предел относительной погрешности, в зависимости от диапазона измерений  $\pm 5,0 \div 10,0$  %.

Принцип измерения заключается в сорбции нефтепродуктов адсорбентом в поглотительном патроне, последующем экстрагировании сорбированных нефтепродуктов гексаном с переводом их в индикаторную трубку, заполненную гранулированным индикаторным веществом, меняющим свою окраску при взаимодействии с нефтепродуктами. Фактически соединенные последовательно патроны установки представляют собой хроматографическую колонку [26].

*Метод перегрева жидкостей на поверхности проволочного зонда.* Метод предназначен для отслеживания остаточного уровня влаги в нефтепродуктах и основан на многолетней истории развития метода импульсного нагрева проволочного зонда [27].

Сущность метода заключается в следующем: тонкий проволочный зонд служащий одновременно источником тепла и термометр сопротивления (изготовлен из платиновой и никелевой проволоки диаметром 20 мкм и длиной  $3 \div 5$  мм), погружается в исследуемую жидкость. Измерения зависят от типа методики: напряжение разбаланса мостовой схемы либо падение напряжения на зонде и на образцовом резисторе.

По полученным данным вычисляют значения среднемассовой температуры зонда и мощ-

ности его нагрева в зависимости от времени. Метод относится к неразрушающему контролю, т.к. продолжительность измерения составляет несколько миллисекунд, при этом прогревается только тонкий слой жидкости вблизи проволоки (~10 мкм).

Перегрев нефтепродуктов осуществляется относительно температуры начала термического разрушения в квазистатическом процессе. В подобном состоянии нефтепродукт может существовать без изменений некоторое «время жизни», затем он спонтанно «вскипает» с нарушением сплошности контакта с зондом.

Процесс происходит с резким возмущением теплового режима, поэтому, отслеживая температуру зонда во времени, можно судить о значениях «времени жизни» и температуре «вскипания» [27].

Также, зонд служит датчиком баланса между источниками и стоками тепла с точностью доконцевых потерь, реагируя на изменение интенсивности теплообмена в системе.

Авторами показано, что температура «вскипания» и интенсивность теплообмена в контролируемой жидкости сильно зависят от концентрации летучей примеси, если зонд нагревается до температуры, близкой к температуре спонтанного вскипания чистой жидкости. Для масел и топлив диапазон температур вскипания при импульсном нагреве зависит от состава (марки) и составляет при атмосферном давлении 150÷400°C. Данным методом можно различать содержание влаги с разрешением лучше  $10^{-5}$ .

Недостатком метода является то, что влияние примесей на интенсивность нестационарного теплообмена в системе зонд-жидкость может иметь различный характер для разных типов технологических жидкостей одинакового назначения и зависеть от внешней температуры, меняющей состояние исследуемой жидкости. Также требуется индивидуальная настройка на конкретный тип контролируемой жидкости.

Особенностью, применения многих лабораторных методов определения содержания воды и нефтепродуктов, является удаленность лаборатории от места отбора проб. Поэтому влияющим фактором для всех лабораторных методов является правильность отбора пробы, т.к. соблюдение процедуры и использование аттестованных пробоотборников не исключает неоднородности пробы и ее расслоения при переносе в лабораторию [28]. Особенно это актуально для неустойчивых водонефтяных эмульсий.

Существенное влияние на изменение влаго-

содержания имеет изменение плотности как функции от температуры в процессе измерения, а изменение давления сказывается на значении коэффициента сжимаемости, что также отражается на изменении влагосодержания [29]. Что вносит дополнительные погрешности в результат измерений, вклад которых может быть сравним с погрешностью самого лабораторного метода.

Таким образом, несмотря на разнообразие представленных на рынке лабораторных средств измерения содержания воды, наиболее универсальным является метод Дина и Старка, стандартизированный как ГОСТ 2477-65 в России.

### Измерение содержания воды поточными методами

*Диэлькометрический метод.* Диэлькометрический метод определения содержания воды основан на измерении зависимости диэлектрической проницаемости эмульсии от содержания в ней воды. Метод наиболее применим для эмульсий типа «вода в нефти», в которых непрерывная фаза — нефть, является хорошим диэлектриком, а вода — дисперсная фаза рассматривается как токопроводящая среда [30].

Диэлектрическая постоянная воды в зависимости от температуры изменяется от 50 до 81, а диэлектрическая постоянная неполярных молекул углеводородов составляет от 2 до 4 [31], в связи с этим в зависимости от содержания воды диэлектрическая постоянная смеси также изменяется. Нефтяная эмульсия не является бинарной системой и на изменение диэлектрической проницаемости могут оказывать влияние дисперсность глобул воды в эмульсии, образование двойного электрического слоя вокруг глобул воды, флокуляция дисперсных частиц [30]. Формула Ньютона – Зильберштейна для расчета диэлектрической постоянной эмульсии, учитывающая влияние вышеуказанных факторов, выглядит следующим образом:

$$\varepsilon = \varepsilon_n \left\{ 1 + \frac{3W}{D_1 - W} \left[ 1 + 13,6F \frac{\varepsilon_e + 2\varepsilon_n}{\varepsilon_e + 36,5\varepsilon_n} \cdot \frac{(0,92 - W)^2}{D_1 - W} \right] \right\}$$

где:  $D_1 = (\varepsilon_e + 2\varepsilon_n) / (\varepsilon_e - \varepsilon_n)$ ,  $\varepsilon_e$  — диэлектрическая проницаемость воды,  $\varepsilon_n$  — диэлектрическая проницаемость нефти,  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость эмульсии,  $W$  — объемное содержание воды.

Определение диэлектрической постоянной водонефтяной эмульсии осуществляется емкостным датчиком, после чего с помощью решения системы уравнений определяется состав эмульсии. Чувствительный элемент датчика —

измерительный конденсатор, между обкладками которого располагается исследуемая жидкость [32]. Анализ метрологических характеристик поточных влагомеров с емкостными датчиками, показал, что они работают в диапазоне влагосодержания воды  $0 \div 25\%$ , при этом предел допускаемой абсолютной погрешности не превышает  $\pm 0,5\%$  [32].

Недостатком данного способа является: ограниченный диапазон измерений ( $0 \div 60\%$ ), поскольку в водонефтяных эмульсиях в области концентраций воды  $60 \div 75\%$  наблюдается инверсия фаз, емкостные измерения перестают быть достоверными из-за протекания тока между пластинами конденсатора. Обычно такая ситуация происходит при содержании воды, превышающем  $50\%$ .

Другая сложность при вычислении содержания воды в этом диапазоне заключается в том, что при решении уравнений предполагается, что диэлектрические постоянные воды и нефти неизменны, а это не всегда верно. В эмульсии «вода в нефти», практическая неизменность диэлектрической проницаемости воды не приводит к значительным ошибкам, однако изменение диэлектрической постоянной нефти дает большой разброс показаний, что может быть вызвано изменением плотности, при изменении которой на  $0,1 \text{ г/см}^3$  возникает ошибка в измерениях содержания воды порядка  $3\%$ .

Недостатком метода также являются особенности калибровки емкостных датчиков в приборах. В полном диапазоне зависимость емкости от содержания воды нелинейная, что требует применения нескольких точек для калибровки. Линейный участок наблюдается до  $10\%$  содержания воды.

*СВЧ-методы измерения.* СВЧ-метод, также как и предыдущий, основан на анализе диэлектрических свойств воды [33]. Благодаря несимметричному строению молекула воды, помещенная в переменное электромагнитное поле, начинает колебаться, что приводит к ослаблению электромагнитного импульса. Максимум диэлектрических потерь наблюдается в диапазоне от  $300 \text{ МГц}$  до  $30 \text{ ГГц}$ . В данном методе измеряемым параметром является затухание СВЧ энергии  $N$ , которое выражается формулой:

$$N = 8,86\alpha_e W \rho k l + |\Gamma|$$

где  $\alpha_e$  — коэффициент затухания воды,  $W$  — относительная влажность,  $\rho$  — плотность водонефтяной эмульсии,  $k$  — эмпирическая константа,  $l$  — толщина исследуемого материала,

$|\Gamma|$  — модуль коэффициента отражения поверхности раздела «воздух-водонефтяная эмульсия».

Решив это уравнение относительно  $W$  получаем:

$$W = (N - |\Gamma|) / 8,86\alpha_e \rho k l.$$

По способу взаимодействия СВЧ-поля с эмульсией выделяют: метод отражения или метод свободного пространства, в котором исследуемый материал помещается между двумя антеннами; метод поглощения. Последний, в свою очередь, разделяют на: резонаторные методы (исследуемый материал помещается в резонатор); волноводные методы (исследуемый материал помещается в отрезок волноводной линии); зондовые методы (зонд погружают в исследуемый материал). При этом используют в конструкции влагомеров соответствующие датчики: волноводные, антенные и зондовые [34], которые могут быть источником их инструментальной погрешности.

Диэлектрическая проницаемость нефти сильно зависит от ее углеводородного состава, это приводит к большим погрешностям определения длины волны и коэффициента потерь в эмульсии во всем диапазоне СВЧ-частот. Определено, что наличие свободного газа в водонефтяной эмульсии изменяет ее однородность и приводит к дополнительным погрешностям измерения коэффициента потерь в области низких частот (до  $200 \text{ МГц}$ ) и сантиметровых длин волн СВЧ диапазона [34].

В целом, поточные СВЧ-влагомеры, при работе в низкообводненных средах в диапазоне содержания воды  $0 \div 5\%$ , имеют предел допускаемой абсолютной погрешности  $\pm 0,5\%$  [20].

При увеличении содержания воды до  $60 \div 80\%$  наблюдается обращение фаз в водонефтяной эмульсии, происходит резкое увеличение резонансной частоты, что связано с образованием эмульсии типа «нефть в воде» и переходом электромагнитного поля в пристеночную область. Дополнительная погрешность возрастает, отражаясь на метрологических характеристиках широкодиапазонных СВЧ-влагомеров [1].

Компания Agar Corporation использовала другой принцип измерения содержания воды, основанный на поглощении микроволнового излучения эмульсией. Микроволновое излучение (частотой выше  $1 \text{ ГГц}$ ) интенсивно поглощается полярными молекулами воды и в гораздо меньшей степени неполярными молекулами углеводородов. Метод позволяет определять

воду в нефти с большой точностью при малых содержаниях воды и охватывает при этом весь диапазон (0÷100%), однако при высоких значениях содержаниях воды точность уменьшается. Преимущество метода — незначительное влияние на измерение состава (сорта) нефти. К недостаткам относится влияние на измерение уровня содержания соли в пластовой воде. Влагомеры, основанные на поглощении микроволнового излучения, довольно дороги [35].

СВЧ-методы обладают следующими недостатками: дополнительной погрешностью от воздействия на контролируемую среду внешним электрическим полем; возможностью электрического пробоя в измерительном датчике при большой влажности; изменением мощности, потребляемой генератором вследствие изменения активной составляющей контролируемой среды; необходимостью компенсации одного из диэлектрических параметров (тангенса угла потерь или диэлектрической проницаемости) при определении другого параметра; достижением непрерывности диапазона измерений 0÷100% путем компьютерной «сшивки» градуировочной кривой в области инверсии фаз.

*Оптические методы измерения.* Методы основаны на изменении интенсивности поглощения в коротковолновой области (длина волны от 0,8 мкм до 6,63 мкм, что объясняется тем, что вода и водяной пар имеет в этой области несколько пиков поглощения) инфракрасного спектра [36]. Интенсивность поглощения воды, которая находится в нефтяной фазе, являющейся неполярным растворителем, описывается законом поглощения Бугера-Ламберта-Бера:

$$D = \lg \frac{J_0}{J} = \ln \frac{1}{T} = K_v l c,$$

где,  $D$  — оптическая плотность,

$J_0$ ,  $J$  — интенсивность падающего и проходящего света соответственно,

$T$  — коэффициент пропускания,

$K_v$  — коэффициент поглощения,

$l$  — толщина поглощающего слоя,

$c$  — концентрация воды по массе.

При прохождении параллельного пучка монохроматического излучения через слой водной эмульсии энергия пучка частично поглощается, частично рассеивается и отражается, и лишь часть пучка выходит без изменения первоначального направления и детектируется [36].

Интенсивность рассеянного излучения является функцией: концентрации влаги в эмульсии и условий измерения (длина волны, угол между направлениями падающего и рассеянно-

го излучения); свойств компонентов эмульсии, их коэффициентов преломления, размеров водных глобул [37].

В зависимости от числа длин волн, используемых для измерения, различают одно-, двух- и трех-волновые влагомеры. В одноволновых сравниваются оптические плотности объекта измерения и эталона в области характеристического поглощения волны. Двухволновые сравнивают прозрачность исследуемой жидкости в двух областях — аналитической ( $\lambda_{ан}$ ) и эталонной ( $\lambda_{эт}$ ); при стабилизации интенсивности падающего излучения отпадает необходимость в эталоне. Значения  $\lambda_{ан}$  и  $\lambda_{эт}$  можно выбрать на основе анализа спектров поглощения и рассеяния растворителя и воды. Использование  $\lambda_{ан}$  и  $\lambda_{эт}$ , относящихся к ИК-диапазону, позволяет исключить влияние погрешности на результат измерений от окраски исследуемой жидкой среды. Если контролируемая среда, как нефть и нефтепродукты многокомпонентная, то для исключения влияния различных компонентов вводят дополнительно еще одну опорную длину волны. Трехволновые влагомеры в основном применяются в лабораторных исследованиях. Увеличение числа используемых длин волн анализирующего излучения значительно усложняет прибор, снижает его надежность, а в ряде случаев приводит к неоправданным затратам [36].

Анализ метрологических характеристик приборов показал, что абсолютная погрешность измерений объемной доли воды, при измерениях данным методом в диапазоне измерений объемной доли воды 0÷100% составляет  $\pm 0,4 \div 2\%$  в зависимости от измеряемого диапазона [36]. Это одно из наиболее высоких значений по сравнению с другими поточными влагомерами.

Оптические методы обладают рядом недостатков: невозможность измерения нефти с большой оптической плотностью и очень малым содержанием воды (излучение светодиода практически не доходит до датчика, что не позволяет учитывать с необходимой точностью рассеянный и отраженный световой поток после инверсии водонефтяной эмульсии из прямой в обратную); высокая погрешность, связанная с загрязнением чувствительной поверхности и неравномерностью распределения влаги в объеме исследуемой жидкости [35]; взаимодействие воды с другими веществами, в нефтепродуктах приводит к смещению указанных или появлению новых полос поглощения; молекулы некоторых веществ образуют ассоциаты за счет водородных связей, инфракрасный спектр кото-

рых частично перекрывает полосы поглощения воды.

*Комбинированные методы измерений.* С целью расширения возможностей оптического метода, в модификациях влагомеров ВСН-2-КМ использован так называемый комбинированный метод. В нем, используется метод поглощения водонефтяной смесью инфракрасного излучения и метод измерения полного комплексного сопротивления, с последующей совместной обработкой результатов двух методов измерения. А в приборе ВСН-Л (который также имеет комбинированный принцип действия) реализуются диэлькометрический и оптический методы. При работе данного влагомера в нефтяной фазе смеси («вода в нефти») функционирует диэлектрическая часть прибора, а при работе в водной фазе смеси («нефть в воде») функционирует оптическая часть. Переключение влагомера при изменении фазы смеси производится автоматически.

*Ультразвуковые методы измерений.* Ультразвуковые методы измерения влажности используются для поточного контроля непосредственно на нефтяных скважинах, работая в режиме непрерывного или импульсного излучения. Их работа основана на использовании зависимости скорости распространения ультразвуковых колебаний от влагосодержания водонефтяной эмульсии. Рассмотрим принцип действия метода. Ультразвуковой излучатель формирует акустический импульс, который после прохождения им водонефтяной эмульсии принимается приемником и преобразуется в электрический сигнал, который усиливается и подается на стробируемый компаратор. Компаратор открывается на время приема сигнала при помощи формирователя строб-импульса, что обеспечивает высокую помехоустойчивость схемы. Одновременно с формированием излучающего импульса запускается схема «формирования длительности импульса», которая останавливается сигналом с выхода компаратора. Длительность выходного импульса равняется времени прохождения ультразвукового сигнала от излучателя до приемника. Затем этот импульс преобразуется в постоянный сигнал, амплитуда которого пропорциональна длительности выходного импульса [38].

Основными недостатками этого метода является: чувствительность к акустическому расстройству; наличие в среде мелких пузырьков и капель ведет к рассеянию сигнала, а нефть вызывает очень сильное затухание акустического луча; ультразвуковые анализаторы влажности требуют установки в потоке статических и динамических гомогенизаторов, потребляющих

большое количество энергии потока.

*Радиометрические методы измерений.* Среди других физических принципов, применяемых для измерения содержания воды в нефтепродуктах, используется метод поглощения гамма-излучения от изотопных источников различного типа. Приборы, на основе данного метода, применяются, как правило, в составе установок для измерения многофазных систем, разработанных компаниями Shlumberger и Roxar. В России гамма-излучение для определения массовой доли воды в водонефтяной смеси используется в измерительном устройстве «Нефтеммер-МК10» [35].

Существует, также, радиоизотопный метод измерения с использованием эффектов комптоновского рассеяния и фотоэлектрического поглощения гамма излучения материалом стенок трубопровода и веществами, образующими «сырую» нефть. Сущность метода заключается в том, что на наружной поверхности трубопровода устанавливают многоканальный блок гамма излучения и приемники излучения в виде блоков детектирования. Коллимированный луч гамма-излучения радионуклида Цезий-137 проникает сквозь стенку трубопровода и взаимодействует с ограниченным объемом контролируемой жидкости. При этом происходит преобразование энергии гамма-квантов. Радиоизотопные источники излучения и приемник излучения располагают в плоскостях поперечного сечения трубопровода таким образом, чтобы можно было осуществлять измерение интенсивности прямого излучения, прошедшего сквозь исследуемую среду, и излучения, рассеянного средой под определенными углами, контролируя различные области трубопровода. По степени ослабления излучения и характеру пульсаций сигнала в определенном энергетическом спектре можно оценить измеряемый параметр среды, которая в данном случае является поглотителем излучения. Таким образом, информацию о контролируемой среде несут прямое и рассеянное излучение. Главным преимуществом метода является то, что он позволяет измерять плотности и концентрации нефти, свободного газа и воды гетерогенного нефтегазового потока. При этом абсолютная погрешность измерения плотности в данном случае составляет  $0,001 \text{ г/см}^3$ , относительная погрешность по концентрации воды составляет  $\pm 5\%$ , газа —  $\pm 0,2\%$  [39].

Известен ряд радиометрических методов, основанный на реакциях радиационной химии, в которых водочувствительный реактив содержит радиоактивный элемент, переходящий по-

сле взаимодействия с водой в продукт реакции, служа определению содержания воды в нефтепродуктах. Выделяющийся в результате реакции с водой водород с примесью трития или ацетилен с радиоактивным углеводородом поступает в счетчик  $\beta$ -излучения. Зная активность исходного препарата, можно определить, какое его количество вступило в реакцию с водой, и рассчитать содержание воды в пробе [35].

Радиометрические методы не получили большого распространения из-за применения радиоактивных элементов, весьма сложной аппаратуры и дороговизны.

*Методы ядерного и протонного магнитных резонансов.* Метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) основан на регистрации резонансного поглощения магнитной энергии ядрами водорода, находящимися в постоянном магнитном поле. Метод позволяет произвести надежную идентификацию водорода, входящего в состав воды, и тем самым определить влажность нефтепродукта. Путем анализа многоэкспоненциального спада намагниченности импульсными методиками в разных позициях вдоль трубы определяется средняя намагниченность каждой компоненты, являющаяся величиной массовой доли каждой компоненты многофазной среды в потоке. Датчики устройства на основе ЯМР указывают значения количества текущей среды и изменения в фазах углеводородов.

Рассмотрим прибор определения воды в потоке нефти на основе метода ЯМР. Малогабаритный измерительный комплекс проточного типа «КОУН-ЯМРАН» имеет следующие основные характеристики: температура контролируемой среды  $+5\div+50^\circ\text{C}$ ; давление  $0,1\div6,4$  МПа; плотность среды  $700\div1100$  кг/м<sup>3</sup>; объемная доля воды, нефти и газа  $0\div100\%$ ; пределы допускаемого значения основной приведенной погрешности по воде от  $\pm 0,02\div1$ ; режим работы — непрерывно-циклический [40].

Сущность метода протонного магнитного резонанса (ПМР) заключается в том, что выполняют возбуждение в образце водонефтяной смеси, помещенной в постоянное магнитное поле, сигналов спин-эхо ПМР сериями радиочастотных импульсов. Регистрируют амплитуды спин-эхо в эталонном и измеряемом образцах, причем в качестве эталонных образцов берут компоненты исследуемой смеси — воды и нефти (или нефтепродукта). Измеряют эффективные времена спин-спиновой релаксации в эталонных и измеряемом образцах по начальным участкам огибающих эхо-сигналов в ин-

тервале, который выбирают определенным образом. При этом в образец добавляют компоненту смеси, обуславливающую величину сигнала ПМР компоненты с наименьшим содержанием. Далее определяют концентрацию воды и нефти согласно соответствующим математическим выражениям, кроме этого, дополнительно определяют интегральные параметры дисперсного распределения капель воды из времен спин-решеточной релаксации воды по определенной формуле [41].

*Методы, основанные на измерении плотности.* Сущность метода измерения влажности нефти и нефтепродуктов основана на измерении плотности  $\rho_s$  водонефтяной эмульсии,  $\rho_w$  воды и  $\rho_n$  нефти и подчиняется выражению [1]:

$$\rho_s = [(100 - 0,1W)/\rho_n + 0,01W/\rho_w] - 1.$$

Однако этот метод требует оперативного контроля плотности.

Среди прочих можно отметить попытки использования кориолисовых массометров. Компания Micro Motion, в частности, продвинулась в этом направлении дальше других производителей. Их устройство одновременно определяет массовый расход, плотность и рассчитывает, на основе плотности нефти и пластовой воды, процентное содержание воды и нефти [35].

Основной недостаток данных методов — существенное ухудшение точности измерения в случае тяжелой нефти, когда плотность нефти значительно отличается от плотности воды. Содержание свободного газа в потоке жидкости также значительно ухудшает точность измерения плотности.

Методы и способы измерения объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов, каждый из которых имеет свои особенности аппаратного оформления и программного обеспечения, различаются не только условиями рабочей среды (температура, давление), но и диапазоном измерения содержания воды и основными метрологическими характеристиками.

Все представленные на российском рынке влагомеры, использующие в своей работе различные методы, должны соответствовать требованиям ГОСТ Р 8.661-2009 [42], и иметь ниже следующие метрологические характеристики для измерения объемного влагосодержания нефти при добыче, подготовке и транспортировании для диапазонов измерений содержания воды:

- $0\div2\%$  предел допускаемой основной погрешности  $\pm 0,06\%$ ;
- $2\div10\%$  предел допускаемой основной по-

- грешности  $\pm 0,15\%$ ;
- $10\div 20\%$  предел допускаемой основной погрешности  $\pm 0,2\%$ ;
- $20\div 70\%$  предел допускаемой основной погрешности  $\pm 1\%$ ;
- $70\div 100\%$  предел допускаемой основной погрешности  $\pm 1,5\%$ .

Таким образом, методы определения содержания воды в нефти и нефтепродуктах и эксплуатируемые на их основе влагомеры, можно условно разделить на два типа [1]:

- предназначенные для измерения объемного влагосодержания «товарной» нефти, имеющие диапазон измерений содержания воды  $0\div 10\%$  и абсолютную погрешность  $\pm 0,05\div 0,1\%$ ;
- предназначенные для измерения объемного влагосодержания «сырой» нефти, имеющие диапазон измерений содержания воды  $0\div 100\%$  и абсолютную погрешность  $\pm 0,1\div 4\%$ .

### Заключение

Приведенный обзор показал, что существует довольно существенное многообразие методов и выпускается огромный ассортимент влагомеров на их основе представленных как отечественными, так и зарубежными производителями. Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, соответственно может занять свою нишу в применении при коммерческом учете в системах измерений количества и качества нефти и нефтепродуктов при добыче, транспортировании, переработке, использовании и хранении нефтепродуктов, а так же в решении проблем связанных с экологической составляющей их использования. Безусловно, в будущем, наиболее перспективными будут являться влагомеры, использующие комплексный подход к вопросам измерения объемной доли воды в нефти и нефтепродуктах.

В обзоре авторы не ставили задачу рассмотрения и сравнения между собой характеристик влагомеров. Надо понимать, что метрологические характеристики влагомеров разнообразны и зависят как от свойств измеряемой среды, так и от специфики технологических процессов, в которых они используются. При этом влагомеры используют различные методы измерений, широко и в огромном ассортименте представленные на мировом рынке. Эту задачу планируется рассмотреть в следующем обзоре.

### Список литературы

1. Сладовский А.Г. Совершенствование методов и средств воспроизведения и передачи единицы объемного влагосодержания нефти и нефтепродуктов: Дис. канд. техн. наук / Сладовский Анатолий Геннадьевич. — Казань, 2017. — 178 с.
2. Учет углеводородного сырья: новый взгляд на привычные вещи // Нефтяное хозяйство. — 2013. — № 3. — С. 8—9.
3. Когогин, А. А. Учет нефти и нефтепродуктов. Метрологическое обеспечение / А. А. Когогин, И. И. Фишман, А. Г. Сладовский // Контроль качества продукции. — 2010. — № 1. — С. 28—31
4. Поздняков А.П. Состояние учета количества и качества нефти в жизненном цикле «добыча — потребление» нефти по России / А.П. Поздняков, В.Н. Карандин // Нефть, газ и бизнес. — 2003. — № 2. — С. 30—33
5. Федеральный закон от 27 июля 2006г. N151-ФЗ «О внесении изменений в главу 26 части второй Налогового кодекса...» [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://ivo.garant.ru/#/document/12148556/paragraph/2035:1>
6. ГОСТ 8.615-2005. Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования. — М.: Стандартинформ, 2005. — 42с.
7. Алимжанова М.Б. Разработка хроматографических методов определения углеводородных горючих в объектах окружающей среды Казахстана: Дис. док. фил. Алимжанова Мереке Бауржановна. — Алматы, 2012 — 115 с.
8. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы СанПиН 2.1.4.1074-01. Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества. М.: Минздрав РФ, — 2002. — 104 с.
9. ГОСТ 17.1.4.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к методам определения нефтепродуктов в природных и сточных водах. Издание официальное, М.: Стандартинформ, — 1992. — 2 с.
10. Абрамов, Г. С. Рекомендации по доработке ГОСТ Р 8.615-2005 / Г. С. Абрамов // Мир измерений. — 2013. — № 3. — С. 43—47.
11. ГОСТ 8.595-2004. Массо нефти и нефтепродуктов. Общие требования к методикам выполнения измерений. — М.: Стандартинформ, 2005. — 16с.
12. Рыбак, Б. М. Анализ нефти и нефтепродуктов / Б.М. Рыбак. - 5-е изд., доп. и перераб. — М.: Гостоптехиздат, 1962. — 888 с.
13. ГОСТ 1547-84 Масла и смазки. Методы определения наличия воды. — М.: Стандартинформ, 2015. — 2с.
14. Байков, Н. М. Лабораторный контроль при добыче нефти и газа / Н. М. Байков, Х. Х. Сайфутдинова, Г. Н. Авдеева. — М.: Недра, 1983. — 128 с.

15. ГОСТ 2477-65 Нефть и нефтепродукты. Метод определения содержания воды. — М.: Стандартинформ, 2004. — 6с.
16. Немиров, М. С. Измерение содержания воды в нефти в лабораториях нефтяной промышленности / М. С. Немиров, Т. Г. Силкина, Р. Р. Ибрагимов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2011. — № 4. — С. 39-40.
17. Fisher, K. Neues Verfahren zur mass analytischen Bestimmung des Wassergehaltes von Flüssigkeiten und festen Körpern // Angew. Chem. — 1935. — №48. — P. 394.
18. ГОСТ Р 54284-2010 Нефти сырые. Определение воды кулонометрическим титрованием по Карлу Фишеру. — М.: Стандартинформ, 2011. — 11 с.
19. METTLER TOLEDO. Руководство по эксплуатации. Титраторы DL 32/ DL 39 (Титрование по методу К. Фишера).
20. МИ 2366-2005. Рекомендация. Система обеспечения единства измерений. Влагомеры нефти типа УДВН. Методика поверки.
21. ТУ 4318-004-437172286-2005 Влагомер сырой нефти лабораторный ВСН-Л. Технические условия.
22. ISO 9114:1997 НЕФТЬ СЫРАЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ВОДЫ ПО РЕАКЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ ГИДРИДОВ. МЕТОД ИСПЫТАНИЯ В ПОЛЕВЫХ УСЛОВИЯХ. ТС 28/SC 6. — 1997. — 17 С.
23. Сусарев С.В. Определение содержания воды и металлосодержащих микроэлементов в нефти в потоке трубопровода / С.В. Сусарев, В.Н. Астапов // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер. Технические науки. 2011. — № 1 (29). — С. 233—237.
24. ГОСТ 51797-2001 Вода питьевая. Метод определения содержания нефтепродуктов. — М.: Стандартинформ, 2001. — 12 с.
25. ГОСТ Р 52406-2005. Вода. Определение нефтепродуктов методом газовой хроматографии. — М.: Стандартинформ, 2005. — 18 с.
26. ТУ У 14204048.009-96 Установка для экспресс-контроля нефтепродуктов в воде «Лилия-1».
27. Волосников Д.В. Метод экспресс-контроля остаточного влагосодержания в нефтепродуктах по комплексу их тепловых свойств / Д.В. Волосников, Д.А. Галкин, К.В. Лукьянов, А.А. Старостин, В.В. Шангин // Вестн. Казан. техн. ун-та. 2014. — Т. 17 — № 21. — С. 93—96.
28. Немиров М.С. Влияние структуры потока сырой нефти на достоверность отбора проб / М.С. Немиров, Т.Г. Силкина, М.В. Крайнов, Р.Р. Нурмухаметов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2015. — № 4. — С. 6—9.
29. Немиров, М. С. Оценка погрешности коэффициентов объемного расширения нефти и нефтепродуктов / М. С. Немиров, Т. Г. Силкина, Р. Р. Газизов // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2012. — № 4. — С. 72—75.
30. Бенин С.Д. Диэлектрическая проницаемость нефтяных эмульсий /С. Д. Бенин, В. А. Гершгорен, К. С. Романько. и др. // Нефтяное хозяйство. 1975. — № 11. — С. 34 — 37.
31. Ахадов Я. Ю. Диэлектрические свойства бинарных растворов. Справочник / Я. Ю. Ахадов. — М.: наука, 1977. — 400 с.
32. ГОСТ 14203-69 Нефть и нефтепродукты. Диэлькометрический метод определения влажности. — М.: Издательство стандартов, 1999.— 6с.
33. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влагометрии / В. К. Бензарь.—Минск: Высшая школа, 1974.—352 с.
34. Вороненко А.В. Погрешность измерения влагосодержания нефти в СВЧ диапазоне / А.В. Вороненко, В.В. Аверин, Д. Е. Ушаткин // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2014. — № 5. — С. 10—19
35. Гончаров А.А. Методы определения обводненности сырой нефти: отечественный и зарубежный опыт / А.А. Гончаров, В.М. Полторацкий, М.А. Слепян // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности, 2008. — №4. — С.54-57.
36. Рахимов Н.Р. Многофункциональные системы мониторинга нефтесодержащих сред и металлических конструкций на основе полупроводниковых источников и приемников излучения: дис. д-ра техн. наук: 01.04.10 / Рахимов Нетматжон Рахимович. — Ташкент, 2006 — 246 с.
37. Рахимов Н.Р. Оптоэлектронные методы измерения и контроля технологических параметров нефти и нефтепродуктов / Н.Р.Рахимов, В.А. Жмудь, В.А.Трушин, И.Л. Рева, И.А. Сатволдиев // Автоматика и программная инженерия. — 2015. — №2(12). — С. 85—108.
38. Дробков В. П. Методы и средства измерений влажности нефти (обзор) / В. П. Дробков, С. А. Лабутин // Датчики и системы. — 2002. — № 11. —С. 23—27.
39. Быков А.Е. Бесконтактный метод измерения покомпонентного состава нефтегазоводяной смеси в трубопроводе / А.Е. Быков, Войтюк И.Н. // International scientific review, 2016. — №5(15). — С.36—40
40. Кашаев Р.С. Проточные ЯМР-анализаторы для контроля скважинной жидкости, сырой нефти и нефтяных дисперсных систем / Р.С. Кашаев, Б.Э.Кубанго // Тамбов-Казань:ООО «Консалтинговая компания Юком», 2016.—82с.
41. Кашаев Р.С. Анализ многофазных потоков методом ядерного (протонного) магнитного резонанса (ПМР) / Р.С. Кашаев // Вестник Казанского государственного энергетического университета, 2016. — № 3(31). — С. 79—96.
42. ГОСТ Р 8.661-2009. Государственная система обеспечения единства измерений. Влагомеры нефти. Нормируемые метрологические характе-

ристики. — М.: Стандартинформ, 2010. — 4 с.

## References

- Sladovsky A.G. Perfection of methods and means of reproduction and transfer of a unit of volumetric moisture content of oil and oil products: PhD Thesis, Kazan, 2017, — 178 p.
- Accounting for hydrocarbon raw materials: a new view of the usual things. Oil industry, 2013, No.3, P. 8—9.
- Kogogin A. A. Accounting for oil and oil products. Metrological assurance. Quality control of products, 2010, No. 1, P. 28—31.
- Pozdnyakov A. P. The state of accounting for the quantity and quality of oil in the life cycle "production — consumption" of oil in Russia. Oil, gas and business, 2003, No. 2, P. 30—33.
- Federal Law of July 27, 2006. N151—FZ "On Amending Chapter 26 of Part Two of the Tax Code" [Electronic resource]. — Access mode: <http://ivo.garant.ru/#/document/12148556/pa-paragraph/2035:1>
- GOST 8.615-2005. Measurements of the amount of oil and oil gas extracted from the bowels. General metrological and technical requirements. Moscow: Standardinform, 2005, 42 p.
- Alimzhanova M. B. Development of the method for the detection of hydrocarbon—rich in environmental objects in Kazakhstan: PhD Thesis, Almaty, 2012, 115 p.
- Sanitary-epidemiological rules and norms SanPiN 2.1.4.1074—01. Drinking water. Hygienic requirements for water quality of centralized drinking water supply systems. Quality control. Moscow: Ministry of Health of the Russian Federation, 2002, 104 p.
- GOST 17.1.4.01-80. Protection of Nature. Hydrosphere. General requirements for methods for determining petroleum products in natural and waste water. The official edition, Moscow: Standardinform, 1992, 2 p.
- Abramov G. S. Recommendations for the finalization of GOST R 8.615-2005. The World of Measures, 2013, No. 3, P. 43—47.
- GOST 8.595-2004. Mass oil and oil products. General requirements for measurement procedures. Moscow: Standardinform, 2005, 16 p.
- Rybak B. M. Analysis of oil and petroleum products. 5-th ed., Ext. and Mod., Moscow: Gostoptekhizdat, 1962, 888 p.
- GOST 1547-84 Oils and greases. Methods for determining the presence of water. Moscow: Standardinform, 2015, 2 p.
- Baikov N. M. Saifutdinova Kh. Kh., Avdeeva G. N. Laboratory control at the production of oil and gas. Moscow: Nedra, 1983, 128 p.
- GOST 2477-65 Oil and oil products. Method for determination of water content. Moscow: Standardinform, 2004, 6 p.
- Nemirov. M.S., Silkina T.G., Ibragimov R.R. Measurement of water content in oil in laboratories of oil industry. Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2011, No. 4, P. 39—40.
- Fisher K. Neues Verfahren zur mass analytischen Bestimmung des Wassergehaltes von Flüssigkeiten und festen Körpern. Angew. Chem, 1935, No.48, P. 394.
- GOST R 54284-2010 Crude oils. Determination of water by coulometric titration according to Carlo Fischer. Moscow: Standardinform, 2011, 11 p.
- METTLER TOLEDO. Manual. Titrators DL 32 / DL 39 (Titration by the method of K. Fisher).
- MI 2366-2005. Recommendation. System for ensuring the uniformity of measurements. Hydrometers of oil of type UDVN. Verification procedure.
- Specification 4318-004-437172286-2005 The moisture meter of crude oil laboratory VSN-L. Technical conditions.
- ISO 9114: 1997 Crude oil. Determination of the water content by the hydride formation reaction. Test method in the field. TS 28 / SC 6, 1997. 17 p.
- Susarev S. V. Astapov V. N. Determination of water content and metal-containing trace elements in oil in the pipeline flow. Vestn. Samar. state. tech. University. Ser. Technical science, 2011, No.1 (29), P. 233—237.
- GOST 51797-2001 Drinking water. Method for determining the content of petroleum products. Moscow: Standardinform, 2001, 12 p.
- GOST R 52406-2005. Water. Determination of oil products by gas chromatography. Moscow: Standardinform, 2005, 18 p.
- TU U 14204048.009-96 Installation for express control of petroleum products in water "Lily-1".
- Volosnikov D.V., Galkin D.A., Lukyanov K.V., Starostin A.A., Shangin V.V. The method of express control of the relative moisture content in petroleum products according to the complex of their thermal properties. Vestn. Kazan. tech. University. 2014, T. 17, No. 21, P. 93—96.
- Nemirov M.S., Silkin TG, Krainov M.V., Nurmukhametov R.R. Influence of the structure of the crude oil flow on the reliability of sampling. Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2015, No. 4, P. 6—9.
- Nemirov M., Silkina T.G., Gazizov R.R. Estimation of the error in the coefficients of volumetric expansion of oil and petroleum products. Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2012, No. 4, P. 72—75.
- Benin S.D., Gershgorin V.A., Romanko K.S. Dielectric permeability of oil emulsions. Oil industry, 1975, No. 11, P. 34—37.
- Akhadov Ya. Yu. Dielectric properties of binary solutions. Reference book. Moscow: Science, 1977, 400 p.
- GOST 14203-69 Oil and oil products. Dielectric

- method for determination of humidity. Moscow: Publishing House of Standards, 1999, 6 p.
33. Benzar V.K. The technique of microwave moisture meter. Minsk: Higher School, 1974, 352 p.
  34. Voronenko A.V., Averin V.V., Ushatkin D.E. The error in measuring the moisture content of oil in the microwave range. Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2014, No. 5, P. 10—19.
  35. Goncharov A.A., Poltoratsky V.M., Slepyan M.A. Methods for determining the water-cut of crude oil: domestic and foreign experience. Automation, telemechanization and communication in the oil industry, 2008, №4, P.54—57.
  36. Rakhimov N.R. Multifunctional monitoring systems for oily media and metal structures based on semiconductor sources and radiation receivers: Dr. Sc. Thesis 01.04.10. Tashkent, 2006, 246 p.
  37. Rakhimov N.R., Zhnurd V.A., Trushin V.A., Reva I.L., Satvoldiev I.A. Optoelectronic methods for measuring and controlling the technological parameters of oil and oil products. Automation and software engineering, 2015, №2 (12), P. 85—108.
  38. Drobkov V.P., Labutin S.A. Methods and means of measuring oil humidity (review). Sensors and systems, 2002, No. 11, P. 23—27.
  39. Bykov A.E. Voytyuk I.N. Non-contact method for measuring the component composition of oil and gas-water mixture in a pipeline. International scientific review, 2016, № 5 (15), P.36—40.
  40. Kashaev R.S., Kubango B.E. Flow-through NMR analyzers for monitoring of borehole fluids, crude oil and oil dispersed systems. Tambov-Kazan: "Consulting company Yukom" Ltd, 2016, 82 p.
  41. Kashaev RS Analysis of multiphase flows by the nuclear (proton) magnetic resonance method (PMR). Bulletin of the Kazan State Energy University, 2016, No. 3 (31), P. 79—96.
  42. GOST R 8.661-2009. State system for ensuring the uniformity of measurements. Hydrometers of oil. Normalized metrological characteristics, Moscow: Standartinform, 2010, 4 p.

---

---

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

---

УДК 502.1

### Мониторинг загрязнения почвы химическими элементами территории РДКС «Чайка»

Н.М. Дербасова

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

Статья поступила 26.09.2017 г.; после доработки 31.09.2017 г.

---

#### Аннотация

Приведена экологическая оценка загрязнения почвы опасными химическими элементами территории Республиканского детского клинического санатория «Чайка» Юго-Западной курортной зоны города Евпатория. Выявлены техногенные аномалии ртути, свинца, бария и стронция. Предложены рекомендации по локализации или ликвидации очагов загрязнения.

**Ключевые слова:** аномалия, химический элемент, карта, профиль, суммарный геохимический показатель.

---

### Monitoring of contamination of soil chemical elements territories of RCCS "Seagull"

N.M. Derbasova

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

Received 26.09.2017 y.; received in final form 31.09.2017 y.

---

#### Abstract

Ecological assessment of pollution of the soil is given by dangerous chemical elements of the territory of Republican children's clinical sanatorium "Seagull" of the Southwest resort area of the city of Yevpatoriya. Technogenic anomalies of Hydrargyrum, lead, barium and strontium are revealed. The recommendations about localization or elimination of the centers of pollution are offered.

**Key words:** anomaly, chemical element, card, profile, cooperative geochemical index.

---

#### Введение

Эффективная политика в области охраны окружающей среды, декларированная в действующем природоохранном законодательстве, может осуществляться только на основе полной информации о характеристике природных объектов и комплексной оценке полученных данных. Признавая важность оценки состояния

всех природных сред, вместе с тем, особо следует подчеркнуть актуальность оценки состояния почвы, которая, в силу своей специфики, является средой, депонирующей загрязняющие вещества и во многом определяющей устойчивость экосистемы к негативному антропогенному воздействию. Исследование состояния почвы и грунтов является важнейшим факто-

ром, определяющий экологический статус городской территории.

Республиканский детский клинический санаторий «Чайка» расположен в Юго-Западной курортной зоне города Евпатории. Актуальность работы заключается в определении экологического состояния среды обитания детей, находящихся в стационарных условиях продолжительный период времени (не менее 54 суток). В РДКС «Чайка» лечатся дети, которые пострадали от Чернобыльской катастрофы. Это свидетельствует о необходимости проведения экологической оценки территории РДКС «Чайка» на тяжелые металлы и другие химические элементы.

### Цель работы

Экологическая оценка загрязнения почвы опасными химическими элементами территории РДКС «Чайка».

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть методику экологической оценки;
- проанализировать результаты экологической оценки;
- разработать рекомендации по результатам экологической оценки территории Республиканского детского клинического санатория «Чайка».

### Методика экологической оценки территории Республиканского детского клинического санатория «Чайка»

По закономерностям распределения химических элементов в почвах можно определить экологическую безопасность жизнедеятельности.

При недостатке любого химического элемента в почвах или при избытке наблюдаются патологические новообразования у живых организмов т.е их заболевание [1,2].

Все химические элементы классифицируются по 3 классам опасности [3]:

- мышьяк, кадмий, ртуть, селен, свинец, цинк, фтор, бенз(а)пирен;
- бор, кобальт, никель, молибден, медь, сурьма, хром;
- барий, ванадий, вольфрам, марганец, стронций, ацетофенон.

Химические элементы, находящиеся в почве обладают определенными показателями вредности, т.е являются токсичными [4]. Воздействуя на окружающую среду, приводят к ухудшению нормальной жизнедеятельности

человека и ухудшают плодородные свойства почвы. Поэтому отслеживание этих элементов в почве необходимо как составляющая экологической безопасности жизнедеятельности.

На территории исследований (РДКС «Чайка») отобрано 40 проб почв. Карта фактического материала эколого-геохимического картирования по почвам на тяжелые металлы и другие химические элементы представлена на рис. 1.

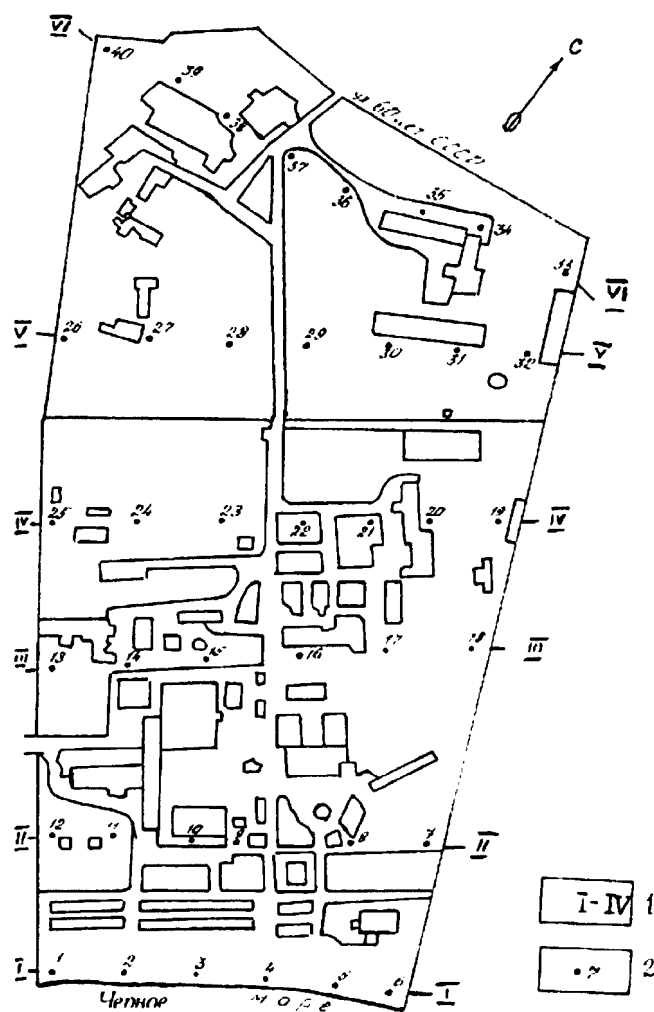


**Рис. 1.** Карта фактического материала по эколого-геохимическому картированию территории РДКС «Чайка» масштаба 1 : 10000

(I – IV) - профили отбора проб почв,  
(1 -40) – точки отбора проб почв.

Отбор проб произведен на шести профилях. В рекреационной зоне санатория отобрано 25 проб почв по четырем профилям (I - IV) В хозяйственной зоне отобрано 15 проб почв на двух профилях (V, VI) (Рис. 1).

Пробы почв проанализированы спектральным методом на 45 элементов и атомно-абсорбционным методом на ртуть.

### Методика отбора проб почв

1. Пробы почв отбирались методом конверта. Размер конверта 1 м х 1 м. В 5 точках отбираются навески, примерно, одинакового объема и объединяются в одну пробу. Масса пробы 50-100 г. Глубина проб почв до 5 см.

2. Затем отобранные пробы подготавливались и обрабатывались к спектральному и атомно-абсорбционному анализу почв (Рис. 2).

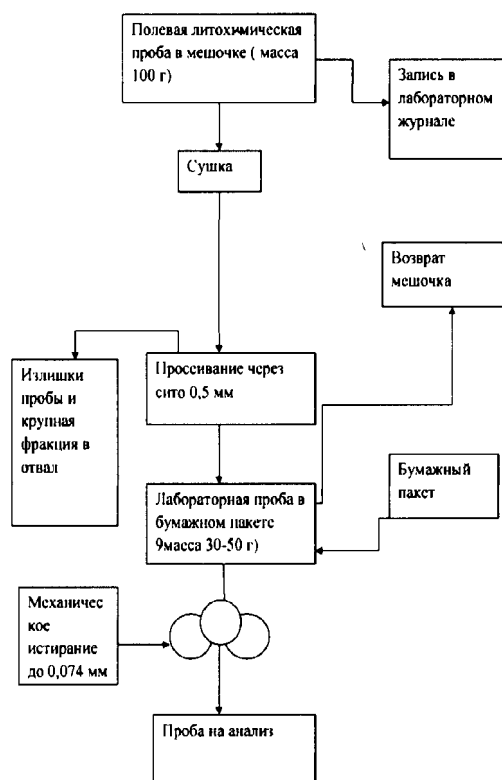


Рис. 2. Схема обработки проб почв.

Пробы почв сушатся в естественных условиях на Солнце. Затем просеиваются через сито 0,5 мм и истираются до 200 меш (0,074 мм.) на валках. Время истирания 2 минуты.

Пробы почв подвергались спектральному анализу на 40-45 элементов и атомно-абсорбционному анализу на ртуть. (Институт Минеральных Ресурсов, Крым).

3. Была выполнена санитарно-гигиеническая оценка почвы с помощью суммарного геохимического показателя.

### Анализ результатов экологической оценки территории Республиканского детского клинического санатория «Чайка»

В работе выявлены закономерности распределения химических элементов по всем 3

классам опасности.

В результате проведенных исследований по 1 классу опасности выявлено:

1. Три аномалии ртути по изоконцентрате 0,1 мг/кг (Рис. 3).

Аномалия 1 расположена в хозяйственной зоне и фиксирует гаражи и теплицы (профили V, VI, точки 27, 39, 40).

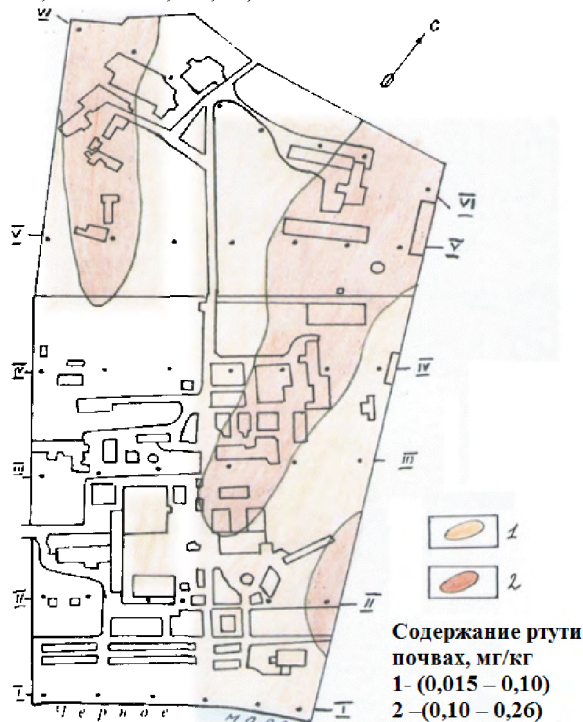


Рис. 3. Карта техногенных аномалий ртути в почвах РДКС «Чайка» масштаба 1:10000.

Аномалия 2 на севере фиксирует котельную и далее проходит в рекреационную зону. В северной части загрязнение ртутью почв идет как от местной котельной, так и от автотранспорта, проходящего по улице 60 лет СССР. В южной части аномалия в рекреационной зоне, по-видимому, связана с тем, что разбиваются термометры и выбрасывается бой в разных местах санатория.

Аномалия 3 зафиксирована по одной точке 7 на профиле II.

2. Содержание свинца на пляже в песке и почвах колеблется от 6,3 до 20,0 мг/кг при ПДК 20 мг/кг при совместном нахождении с ртутью и 32 мг/кг – без ртути. В рекреационной зоне санатория «Чайка» содержание свинца в почвах варьирует от 20 до 50 мг/кг с преобладанием частоты встречаемости 20-25 мг/кг. В хозяйственной зоне санатория «Чайка» обнаружена более интенсивная аномалия свинца, где содержание свинца в почвах достигает 1500 мг/кг (Рис.4).

3. Кроме того, выявлены в почвах санато-

рия слабой интенсивности аномалии фтора. Аномалии, характеризующихся содержанием фтора в почвах выше ПДК не обнаружено. Следует обратить внимание на выделенные три аномалии с содержанием фтора в почвах от 220 до 450 мг/кг (Рис. 5).

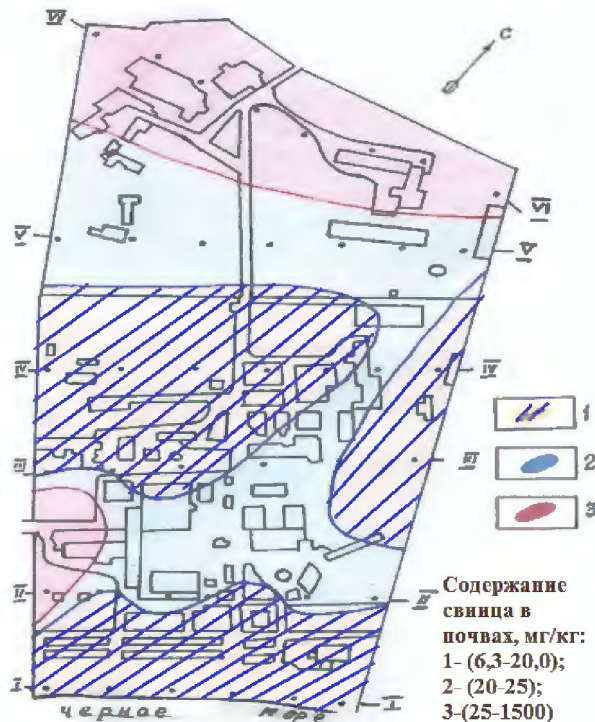


Рис. 4. Карта техногенных аномалий свинца в почвах РДКС «Чайка» масштаба 1:10000.

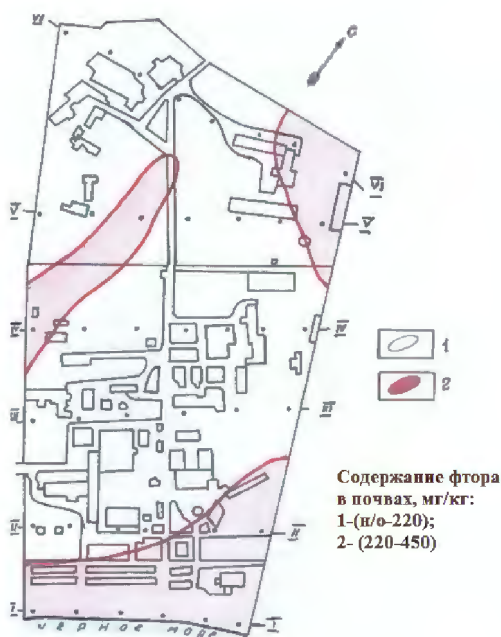


Рис. 5. Карта техногенных аномалий фтора в почвах РДКС «Чайка» масштаба 1:10000.

По 2 классу опасности аномалий не выяв-

лено. Установлена общая закономерность в распределении элементов второго класса опасности. Она заключается в том, что содержание химических элементов ниже в песках и песчаных почвах пляжной части рекреационной зоны.

На остальной территории рекреационной зоны и на территории хозяйственной зоны в почвах наблюдается незначительное повышение содержания элементов второго класса опасности.

По 3 классу опасности:

1. Была выявлена аномалия бария. Аномалии выделены по изоконцентрате 800 мг/кг.

Содержание бария в почвах варьирует от 250 до 1200 мг/кг. ПДК бария в почвах нет. Фоновое содержание бария в почвах Крыма 460 мг/кг. Минимально-аномальное содержание бария при одной, двух и трех сигмах равно, соответственно 660, 900, 1300 мг/кг.

На карте техногенных аномалий (Рис.6) выделены поля: (250-800) и (800-1200) мг/кг.

В аномалии большой наблюдается закономерное увеличение содержания бария в почвах от рекреационной зоны (800 мг/кг) до хозяйственной зоны (1200 мг/кг). Максимальные концентрации бария в почвах фиксируют гаражи и котельная. ПДК бария в почвах нет.

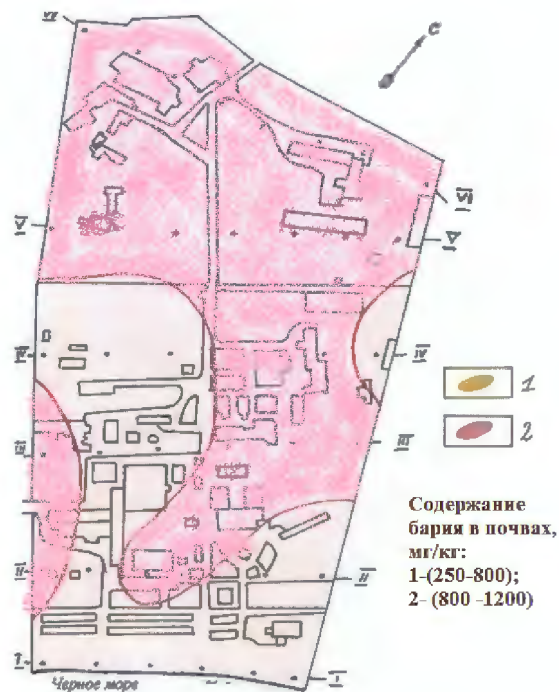


Рис. 6. Карта техногенных аномалий бария в почвах РДКС «Чайка» масштаба 1:10000.

2. На территории исследований обнаружено три аномалии марганца (Рис.7). Содержание

марганца в почвах колеблется от 400 до 1000 мг/кг. На территории хозяйственной зоны выявлено две аномалии марганца. Одна аномалия фиксирует гаражи, а вторая – склады. В рекреационной зоне аномалия марганца фиксирует скважину с минеральной водой. ПДК марганца в почвах 1000 мг/кг.

3. По изоконцентрате 630 мг/кг ооконтурено три аномалии стронция (Рис.8). Содержание стронция в почвах аномалий варьирует от 630 до 800 мг/кг. За пределами аномалий стронций не обнаружен. ПДК стронция в почвах нет.

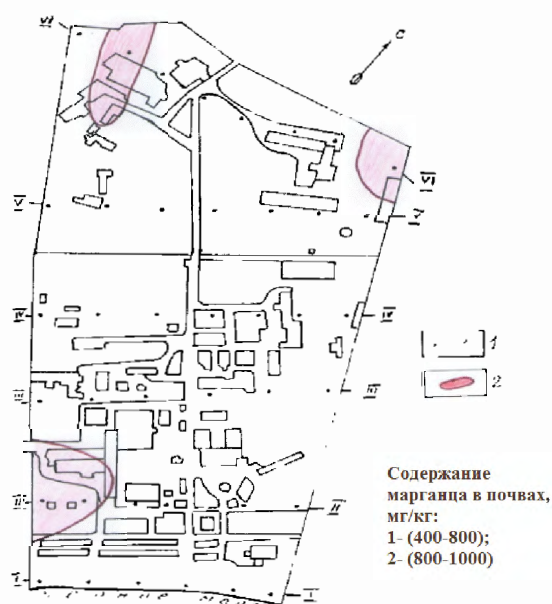


Рис. 7. Карта техногенных аномалий марганца в почвах РДКС «Чайка» масштаба 1:10000.



Рис. 8. Карта техногенных аномалий стронция в

почвах РДКС «Чайка» масштаба 1:10000.

Из других химических элементов в почвах обнаружены аномалии германия, серебра и кальция.

1. Германий. На карте техногенных аномалий германия выделены поля: («не обнаружено»- 1,2) (1,2 – 1,5) и (1,5 - 2,5)мг/кг.(Рис.9) Аномалия с содержанием германия 2,5 мг/кг фиксирует котельную.

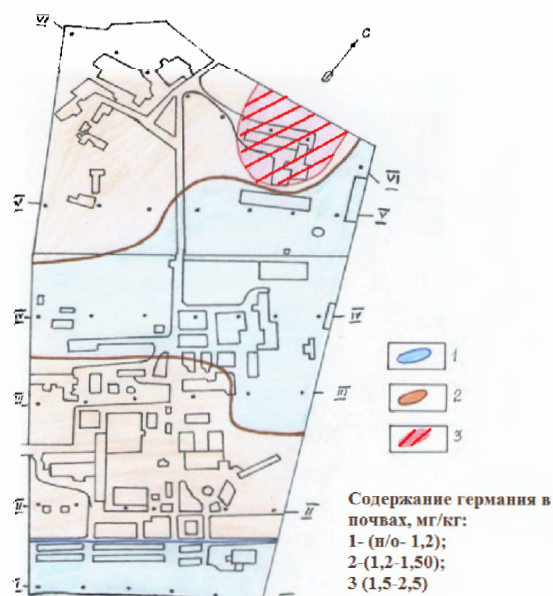


Рис. 9. Карта техногенных аномалий германия в почвах РДКС «Чайка» масштаба 1:10000.

Германий находится в каменных углях, шлаках. При сжигании каменного угля в котельной германий выбрасывается в атмосферный воздух и рассеивается.

2. Серебро. На территории исследований обнаружена одна аномалия серебра в почвах. Аномалия фиксирует гаражи.

3. Кальций. Обнаружена одна аномалия кальция. Она связана с карбонат содержащими песками пляжа. Аномалии кальция фиксируют пляжную зону.

По результатам суммарного геохимического показателя составлена карта санитарно-гигиенической оценки загрязнения почв РДКС «Чайка». На карте выделено три категории загрязнения почв (Рис.10):

- допустимая  $Z_c = 4,2 - 16$ ;
- умеренно опасная  $Z_c = 16-32$ ;
- опасная  $Z_c = 32-85$ ,

Таким образом, почти вся территория РДКС «Чайка» относится к допустимой категории загрязнения почв. Умеренно опасная и опасная категории загрязнения почв находятся

в пределах хозяйственной зоны. На этой территории расположены гаражи, детский сад, склады, котельная, теплица. Основными загрязнителями почв являются свинец, ртуть, стронций и барий.

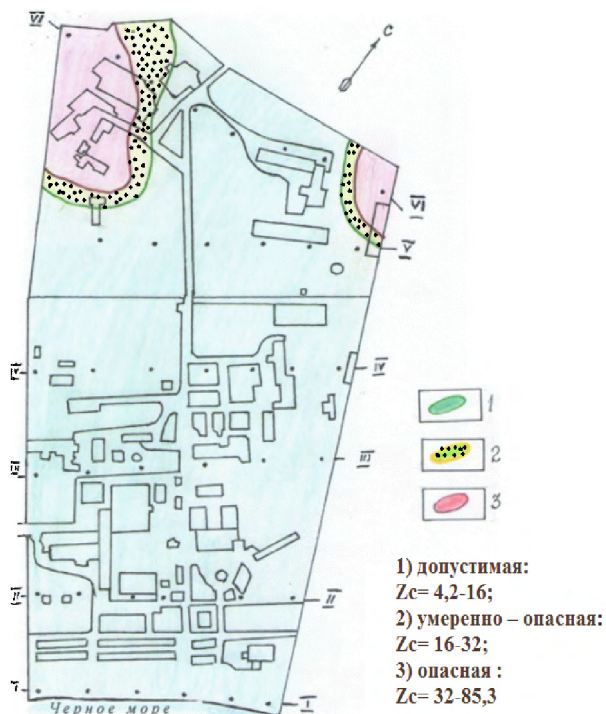


Рис. 10. Карта санитарно-гигиенической оценки загрязнения почв РДКС «Чайка» масштаба 1: 10000.

### Выводы

На основании выше сказанного для оздоровления экологической обстановки рекомендуется проведение таких мероприятий:

1. перевести автотранспорт на газ или неэтилированный бензин;
2. вывести автотранспорт в спецзону пгт. Заозерное. Если нет возможности ликвидировать гаражи, то необходимо провести вокруг них 3-5 ярусное сплошное озеленение;
3. Вокруг котельной, складов произвести планировку местности путем засыпки ее почвой и грунтом с фоновым содержанием тяжелых металлов. Толщина засыпки 20-40 см;
4. запретить въезд стороннего автотранспорта на территорию рекреационной зоны.

Большую экологическую проблему составляют разбитые и отработавшие ртутные люминесцентные лампы и градусники для этого необходимо категорически запретить выполнять замеры температуры ртутными гра-

дусниками в общественных комнатах.

### Список литературы

1. Захаров Е.П. Методика и результаты эколого-геохимического картирования промышленно-городских агломераций, сельскохозяйственных угодий и рекреационных зон Крыма// Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в государствах с переходной экономикой. Материалы Международной научнотехнической конференции к 80-летию Национальной Академии Наук Украины. - Симферополь: СОНАТ, 2001.-с.100-105.
2. Ревич Б.А., Сает Ю.Е. Эколого-геохимическая оценка окружающей среды промышленных городов// Урбоэкология. Научный совет по проблемам биосферы. - М.: Наука, 1990.-186-197с.
3. Барсуков Н.П., Кузнецова Е.Ю., Юнси Г.А. Основы экологической токсикологии. Учебное пособие. - Симферополь: ТЭИ, 2004. - 150с.
4. Валова, В.Д. (Копылова) Экология: учебник / В.Д. Валова. - М: Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2010. - 359с.

### References

1. Zakharov E.P. A technique and results of ekologo-geochemical mapping of production and city agglomerations, agricultural grounds and recreational zones of the Crimea//Topical issues of development of innovative activity in the states with a transitional economy. Materials of the International scientific and technical conference for the 80 anniversary of National Academy of Sciences of Ukraine. - Simferopol: SONATAS, 2001. - page 100-105.
2. Revich B.A., Sayet Yu.E. Ekologo-geokhimicheskyy assessment of a surrounding medium of the production cities//Urboekologiya. Scientific council on biosphere problems. - M.: Science, 1990. - the 186-197th.
3. Barsukov N.P., Kuznetsova E.Yu., Yunsi G.A. Fundamentals of ecological toxicology. Manual. - Simferopol: TEI, 2004. - 150 p.
4. Valova, EL (Kopylov) Ecology: textbook / EL of Valov. - M: Publishing and trade corporation "Dashkov and C", 2010. - 359 p.

УДК 621.92., 551.46.09.

## Современные угрозы климатических и экологических изменений, связанные с энергетической деятельностью человека

Н.В. Морозова<sup>1</sup>, Н.В. Урикова<sup>2</sup>, Е.А. Емец<sup>3</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>innat.m@mail.ru, <sup>2</sup>Nadejda77777@yandex.ru, <sup>3</sup>le.em@mail.ru.

Статья поступила 27.11.2017 г.; после доработки 07.12.2017 г.

### Аннотация

В статье приведены последние научные данные, касающиеся климатической и экологической безопасности, а также рассмотрены основные причины и последствия скоростного изменения климата и общий стремительный рост динамики катаклизмов.

Ключевые слова: энергетическая деятельность человека, скоростное изменение климата, экология, динамика катаклизмов, человеческий фактор.

## Modern threats of climatic and ecological safety

N.V. Morozova<sup>1</sup>, N.B. Urikova<sup>2</sup>, E.A. Yemetz

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, <sup>1</sup>innat.m@mail.ru, <sup>2</sup>Nadejda77777@yandex.ru, <sup>3</sup>le.em@mail.ru.

Received 27.11.2017 y.; received in final form 07.12.2017 y.

### Abstract

The article presents the latest scientific data of climate and ecological safety, and the main causes and consequences of rapid climate change and the general rapid growth of the dynamics of cataclysms

Keywords: rapid climate change, ecology, the dynamics of cataclysms, cosmic-terrestrial and human factors.

### Введение

В настоящее время, в результате деятельности человека происходит непоправимое изменение климата, связанное с использованием значительного количества энергетических ресурсов традиционного происхождения (углеводороды, каменный уголь и др.). Средняя температура планеты за последние годы может подняться на несколько градусов, что приведет к необратимым последствиям.

В данное время одной из важнейших международных проблем является скоростное изменение планетарного климата и общий стре-

мительный рост динамики катаклизмов. На сегодняшний день существует большой риск недопонимания и недооценки многих причин и масштабов влияния разнообразных космических, геофизических и антропогенных факторов на эти проблемы.

На основе последних данных наземных и космических регистраций климатологи, геофизики, космофизики, экологи и метеорологи утверждают, что идет скоростное, коренное изменение климата планеты. Ученые сегодня фиксируют реакцию минерального, растительного, животного мира и человечества на проис-

ходящие процессы климатического преобразования.

Анализ роста числа природных катаклизмов, экстремальных погодных явлений по всему миру, а также статистических показателей космических, антропогенных и геофизических параметров за последние годы показал несостоятельность различных предыдущих гипотез и теорий о постепенном изменении климата на нашей планете. Сегодня, когда спектр научных исследований стал гораздо шире, выявлена тревожная тенденция к значительному росту многих параметров данных явлений за короткий промежуток времени. Оказалось, что все климатические и энергоёмкие процессы происходят гораздо динамичнее. Многие ученые прошлых лет не учитывали новое физическое состояние нашей Солнечной системы, ускорение процессов во Вселенной, новые космические воздействия и качества космических лучей, а также деятельность многомиллиардного земного человечества.

За последние три десятилетия настораживающие изменения геофизических параметров планеты, появление разнообразия наблюдаемых аномалий, увеличение частотности и масштабов экстремальных явлений, скачкообразное усиление природных катаклизмов в атмосфере, литосфере, гидросфере Земли свидетельствуют о выделении чрезвычайно высокого уровня дополнительной экзогенной (внешней) и эндогенной (внутренней) энергии.

Как известно, с 2011 года этот процесс начал входить в новую активную фазу, о чём свидетельствуют заметные скачки выделяемой сейсмической энергии, зафиксированные при участившихся сильных землетрясениях, а также увеличение числа мощных разрушающих тайфунов и ураганов, повсеместное усиление грозовой активности и другие аномальные явления природы.

Общество вошло в эпоху глобальных геофизических и климатических перемен и данные проблемы уже нельзя рассматривать как исключительно научные. Эти комплексные проблемы охватывают социальные, экономические, экологические, этические и другие аспекты. Даже та публичная информация, которая ныне доступна для мировой общественности, свидетельствует о развитии крайне негативной экологической и климатической ситуации для человечества.

Постоянное ускорение разнообразных и энергоёмких процессов на Земле вызывает интенсивные отклики биосферы.

Уже отмечается реагирование живых систем, а значит и всех жизненных процессов, на скоростные изменения климата (потепление с последующим похолоданием); подъем уровня Мирового Океана; геомагнитную переполусовку; усиление геодинамических процессов (землетрясения, извержения вулканов) на экологические изменения [1,2].

### **Цель и задачи исследования**

Целями данной работы являются следующие:

- на основе последних данных наземных и космических регистраций показать идущее скоростное, коренное изменение климата планеты, всех ее геофизических параметров, появление разнообразных наблюдаемых аномалий, усиление природных катаклизмов и экологических опасностей во всех сферах Земли;
- приблизиться к точным знаниям о глубинных причинах зарождения энергоактивных явлений;
- прогнозировать ход развития процессов и явлений и с более высокой точностью рассчитывать поведение природы, а, значит, заблаговременно принимать меры для полного, либо частичного, предотвращения катастрофических явлений, в крайнем случае, их смягчения, или, хотя бы, заблаговременной эвакуации населения;

Для реализации поставленных целей необходимо решить следующие задачи:

- 1) провести анализ наблюдаемых аномалий геофизических, метеорологических, экологических и других параметров планеты;
- 2) выявить причины появления разнообразия и увеличения частотности и масштабов экстремальных явлений;
- 3) осознать ответственность за нецелесообразное использование энергоресурсов, приводящее к изменению климата на планете;
- 4) приблизиться к пониманию необходимости отказа от постоянного увеличения потребления традиционных энергоресурсов для удовлетворения потребностей человека и перехода на возобновляемые источники энергии.

### **Причины и последствия климатического и экологического переустройства мира**

*Влияние космических и геофизических факторов.* Исследователи, занимающиеся изу-

чением Солнечно-земных связей, в течение последних десятилетий на основе обработки статистических данных пришли к заключению, что при взаимодействии Солнечной плазмы с геомагнитным полем в окружающем Землю космическом пространстве генерируются электрические поля и токовые системы, формирующие электромагнитную обстановку вблизи нашей планеты и состояние околоземной плазмы. На их формирование оказывает действие целая совокупность условий, связанных как с активностью Солнца, так и состоянием окружающего космического пространства, в том числе и околоземного. Взаимодействие плазмы и Солнечного электромагнитного излучения с геомагнитным полем и околоземной средой создает системы электрических токов, вызывающих вариации магнитного поля Земли. Во время магнитных бурь возникают глобальные магнитные возмущения, фиксируемые на всей поверхности земного шара (рис. 1).

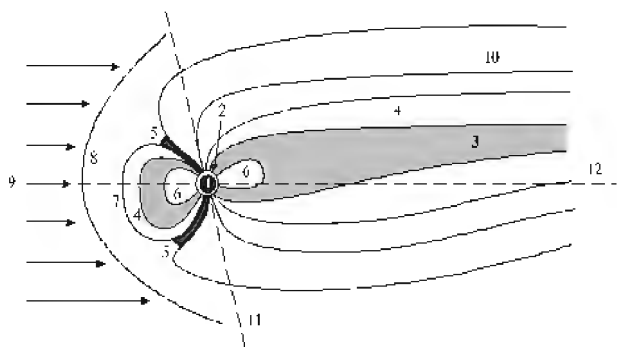


**Рис. 1.** Общая схема магнитосферы Земли [3]:

1 - ядро Земли, 2 - ионосфера, 3 - плазменный слой, 4 - кольцевой ток, 5 — полярные щели (каспы), 6 - плазмосфера, 7 - граница магнитосферы (магнитопауза), 8 - переходный слой, 9 - Солнечный ветер, 10 - хвост магнитосферы, 11 - линия между магнитными полюсами, 12 - линия Солнце-Земля.

Для многих исследователей стало ясно, что погода и климат на Земле контролируются именно поведением магнитного и электрического полей, которыми Земля связана с внешней средой — Солнцем, Юпитером, другими планетами и межпланетным пространством.

Пространство, которое окружает сейчас Землю (рис. 2), находится в постоянном магнитоэлектрическом "мерцании", то есть имеется магнитоэлектрическая неустойчивость [3].

Вместе с магнитоэлектрической неустойчивостью состояния Солнечной системы и геокосмоса возникают и другие планетофизические перемены. Появляются условия для резких ко-

лебаний температур, зарождения тайфунов, ураганов и т.д. Постоянное внесение в состояние Земли дополнительных энергий и вещества вызывает у самого организма Земли сложные адаптационные процессы (рис. 1, 2).

Земля постоянно осуществляет автоматическую подстройку к тому окружению и внешним воздействиям, в которых она находится. К подобной подстройке относится и начавшаяся в середине XIX века переполюсовка магнитного поля Земли. Этот процесс неизбежно сопровождается и будет сопровождаться крупными климатическими преобразованиями.

Серьезные воздействия на биосферу производят:

- 1) рост разнообразия и емкости Солнечно-земных взаимосвязей;
- 2) резкое возрастание энергоемкости и разнообразия грозových разрядов и крупномасштабные последствия переполюсовки геомагнитного поля (инверсия знака);
- 3) переход в неравновесное состояние фоновых характеристик полей температуры и давления в атмосфере [4];
- 4) быстрый рост высокоградиентных процессов влагооборота и влагоперераспределения в атмосфере [5];
- 5) энергетическая деятельность человечества [6, 7];
- 6) изменение магнитных полюсов Земли;
- 7) техногенное давление и электромагнитное загрязнение;
- 8) система ракетных стартов;
- 9) добыча ресурсов;
- 10) рост вулканической и сейсмической активности.

Особое воздействие производит и техногенное давление на глобальную последовательность природных процессов энергетики геолого-геофизической среды. Огромное значение для биосферы имеет процесс возникновения и нарастания интенсивности технического электромагнитного загрязнения. Подчеркнем, что техногенный электромагнетизм вытесняет естественные электромагнитные процессы, влияя даже на солнечно-системные электромагнитные взаимосвязи.

Широко применяемая система ракетных стартов, производит полное вещественное преобразование газоплазменных оболочек Земли.

Добыча ресурсов и строительные работы уже изменили качество гидросферы и, значительно, верхней литосферы.

Поэтому не удивительно, что техногенные процессы создают в геолого-геофизической

среде дополнительные энергоемкие климатогенные и геодинамические события - тайфуны, ураганы, торнадо, смерчи, тектонические дрожания, землетрясения, вулканы [8].

Кроме того, в процессе скоростного изменения климата Земли разнообразятся и множатся грозные процессы, которые, как правило, сопровождают все катастрофические процессы, как в атмосфере, так и в земной коре.

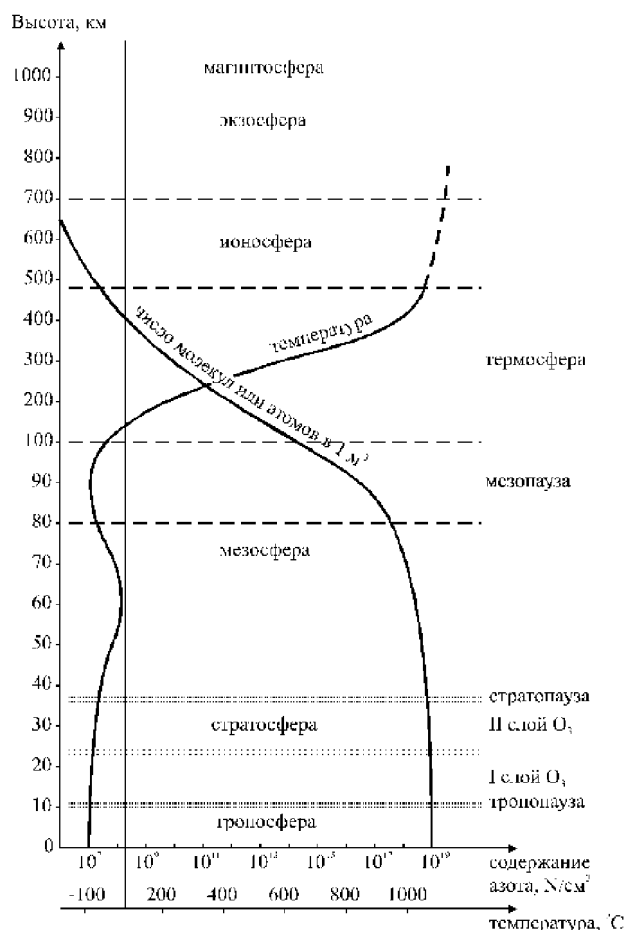


Рис. 2. Общая схема строения нижнего геокосмоса.

**Человеческий фактор.** Логично утверждать, что причины изменения климата, стихийных и техногенных катастроф связаны не только с космо-земными процессами, но и со всеми видами деятельности человека. Симптомы общепланетарного катаклизма налицо, а наша, казалось бы, могучая цивилизация оказалась в абсолютном бессилии. Механизированная и компьютеризированная Земля, наполненная разнообразным оружием массового уничтожения, ведущая войны, разрушающая все сферы прекрасных стихий, в начале третьего тысячелетия оказалась хрупка, как глиняный горшок.

Современное критическое состояние планеты вызвано не только ходом естественных физических процессов в Земле и окружающем ее физическом пространстве, но в большей степени масштабами вмешательства человека в экологическое состояние планеты. Особо опасными для Природы оказываются, как правило, самые новые научные достижения, сверхвысокие технологии, энергии и скорости. Достаточно привести примеры научного открытия атомного распада или ядерного синтеза, когда вся планета оказалась перед угрозой атомного и ядерного оружия.

Интенсивное развитие промышленности, химизация сельского хозяйства, загрязнение атмосферы, литосферы, гидросферы, газоплазменных оболочек Земли продуктами хозяйственной деятельности человека, наряду с расточительной эксплуатацией природных ресурсов обусловили в последние десятилетия распространение на Земле зон экологического бедствия. Разрушительные катастрофы и стихийные бедствия стали знаменем нашего времени [8, 10].

Такая причина как «антропогенное влияние», несомненно, существует, но обычно ограничена чисто технико-экономическими и чисто физическими факторами. Замалчивается или просто игнорируется роль самого главного - фактора влияния негативной деятельности человечества на загрязнение газоплазменных оболочек Земли, на ее ноосферу и все геосферы.

В данное время большинство экологических проблем сведены к парниковому эффекту и носят исключительно политический и коммерческий характер. Вместо ожидаемого массами исполнения правителями оглашенных намерений по улучшению экологической и климатической ситуации на планете, на практике выполнение этих обязательств было превращено в коммерческий проект, торговлю квотами и привело лишь к еще большему обогащению отдельных заинтересованных лиц. К сожалению, эти международные документы стали лишь аргументом в торговых войнах и фактором оказания давления на экономическую политику той или иной страны. Они преследовали в большей степени бизнес интересы финансовой элиты, чем реальную попытку что-то улучшить на планете.

Исследования выдающихся ученых показывают, что в большинстве случаев причинами расстройств стихийных сил природы являются процессы, большая часть которых приходится на энергетическую деятельность человека. При

этом эта деятельность наносит непоправимый вред в результате неправильного понимания человечеством принципов использования энергетических ресурсов в земных условиях. Человеческое мышление не соответствует уровню технико-энергетического развития нашей цивилизации, мысль - это всеначальная космическая энергия, самая могущественная во Вселенной, природа которой мыслящему человечеству пока не известна в полной степени. Свойство этой энергии - накапливаться в пространстве и привлекать энергии подобного характера [6].

Есть все основания считать, что сложившаяся кризисная ситуация обусловлена, не в последнюю очередь, воздействием мыслительной деятельности человечества на экосистему планеты. Экологическое состояние планеты в огромной степени определяется этой деятельностью. Еще в начале XX века В.И. Вернадский пришел к выводу о том, что "коллективное человеческое мышление фактически становится самой мощной геологической силой, с которой необходимо считаться". [7].

Ныне установлено, что энергетические процессы в организме человека находятся в постоянном колебательном движении с той или иной частотой колебаний. Эти колебания могут беспрепятственно передаваться из одной среды в другую и имеют общий характер распространения в твердой, жидкой и газообразной среде. Земной организм резко реагирует на воздействия энергий, которые порождаются техногенной деятельностью человека.

Сегодня, наряду с общеизвестными факторами, можно говорить о влиянии на экологическую ситуацию энергетических полей порождаемых техногенной деятельностью. Новый вид свободной биогеохимической энергии, проявляющейся в процессе жизнедеятельности человека, прослеживается в трудах таких великих ученых, как В.И. Вернадский, А.Л. Чижевский, Л.Н. Гумилев, академик В.П. Казначеев и другие ученые.

Восстановление и оздоровление окружающей среды целесообразно начать с осознания ответственности за свою деятельность. Высокое качество мышления, направленное на общее благо, на благо всего человечества и всего космоса обеспечивает состояние ноосферы, уравновешивающее ее с высокой энергетикой космоса и потому не вызывает резких возмущающих последствий.

Речь идет в первую очередь о переосмыслении техногенной и другой деятельности человечества. В истории известны периоды упадка,

и все они решались при возрождении общечеловеческих духовных ценностей.

**Рост динамики катаклизмов.** Природные катастрофические события неизбежно усугубляются неравновесными техническими системами. Это гидроузлы, атомные станции, линии электропередач, супергорода и т. д. Разрушаясь, эти системы вносят свои губительные вклады, последствия которых намного превысят уже известные технические катастрофы, например, Чернобыльскую, Фукусимскую и др. Судя по имеющимся планам развития технической цивилизации, претензии человечества на преобразование природы нарастают. Соответственно нарастут и последствия.

С учетом всё возрастающей электромагнитной мощности Солнечной системы и попадания ее в галактическую область с мощными магнитонесущими массами, сформулирован вывод о переходе нашей системы в новое геолого-физическое, климатическое и биосферное качество. И именно к этому новому качеству прижизненное (воплощенное) человечество оказалось в своей массе не готовым. Лихорадочное поведение большинства человеческой популяции в международных сценариях "улучшения взаимоотношений", безоглядное устремление к "продовольственной безопасности", неукротимое стремление к "высоким уровням жизни", к комфорту и всё большему энергетическому потреблению являются прямым свидетельством ощущений разворачивающихся катастроф. Земля, как носительница многообразных форм жизни, раненая техническим прогрессом, вступает в фазу космического экзамена.

Может оказаться, что перегрузившая ее человеческая деятельность будет упразднена, а человечество в нынешней его структуре расформировано [8,9].

Темпы космической эволюции начинают опережать эволюцию больной человеческой "беспределом" Земли. В конечном итоге наступает момент, когда Силы, приводящие в эволюционную сцепленность Землю с Космосом, вынуждены проявляться в виде быстропротекающих энергоемких процессов, принимающих для человека вид катастроф. Но если возможен процесс вызывания землетрясений, извержения вулканов и др. энергоактивных явлений, то точно так же возможен процесс их предотвращения, остановки или ослабления.

В современном научно-философском учении «Живая Этика» говорится: «Ярость подземных сил может угрожать и самой планете». [9]. Земля (равно как и живущее на ней челове-

чество) является развивающейся сущностью. В определенные циклические периоды происходит более активный, в сравнении с обычным, приток на землю эволюционных сил, излучаемых Солнцем и иными возвышенными космическими центрами. Земля стремится усвоить эти силы и подстроиться под них, что неизбежно приводит к сейсмическим возмущениям и проявлениям иного рода. Человечество также подвергается ментальному, моральному и физическому воздействию, вследствие вызываемого упомянутым наплывом сил изменения вибрационных уровней. Меняются мысли и идеалы, вновь и вновь происходят революции, войны и эпидемии. И так будет до тех пор, пока не вернется цикл равновесия. Но нормальные силы эволюции не могут действовать, когда умственная, моральная и социальная жизнь мира так неестественна и извращена, как в наше время. И кажется, ничто, кроме чудовищных бедствий, не сможет смести с лица земли грубые формы порока, ненависти и жестокости, препятствующие истинному прогрессу во всех его направлениях; ибо общая беда возвращает равенство – сочувственное, доброжелательное и мирное отношение ко всем категориям людей.

Катастрофы - явление неизменно сопутствующее эволюции Земли. В катастрофах погибают лишь старые формы, непригодные для жизни в новых энергетических условиях. Материал разрушенных форм поступает на строительство новых, более приспособленных и совершенных, соответствующих новым условиям жизни. Буйство стихий стало знаменем нашего времени и предупреждением человечеству о необходимости направить свое мышление на созидание.

При вступлении в новую фазу космической эволюции необходим этический уровень взаимоотношений человека с окружающей средой, основанный на принципах и законах космогеоэтики. Духовный фактор не может не присутствовать на новом этапе развития цивилизации. Его роль становится всё более значительной, когда мощь научно-технического мышления растет, а энергетическое равновесие природной среды становится всё более неустойчивым.

Существует связь между возмущениями, происходящими в недрах земли, и так называемыми толчками и взрывами, сотрясающими все уровни социального организма. У тех и у других одни и те же причины — негативное эгоистическое мышление и все те же самые очистительные силы, действующие сейчас во всех уголках

земли. Единственное отличие состоит в том, что в некоторых случаях более заметны первые, а в некоторых - вторые. Если изучить имеющиеся соответствия, ученые непременно обнаружат причины недавних возмущений всех вулканов, как действующих, так и потухших.

Если бы не периодические извержения вулканов, вся земля развалилась бы на неисчислимое множество осколков, что в конечном итоге когда-нибудь неизбежно произойдет.

Такая глобальная катастрофа всегда настигает мир, наполненный низшими силами и управляемый ими; и именно таким миром является Земля. Впоследствии осколки раздробленной планеты снова притягиваются друг к другу и скапливаются в центре сил, призванных восстановить разрушенную планету. Пройдя период очищения, такая восстановленная планета по прошествии многих столетий снова становится обитаемой. Подобная катастрофа произойдет и с землей, если она не очистится каким-нибудь другим способом. В последнее время мир стал свидетелем продолжительной серии космических, сейсмических и других возмущений, которые будут продолжаться, пока не исполнят свое предназначение [11, 12].

### **Краткий обзор причин и последствий климатических и экологических аномалий**

Космические воздействия – это влияние комет, планет, космических лучей, солнечной активности, падения на Землю астероидов и т.д. В некоторых научных кругах существует мнение, что Земля может погибнуть от столкновения с кометой или крупным астероидом. В связи с этим отметим, что кометы и астероиды не одну тысячу раз падали на нашу планету за время ее существования, и, тем не менее, Земля находится в своем устойчивом эволюционном развитии. Это является прямым доказательством наличия долговременных, пока не выявленных наукой, форм безопасности Земли в составе Солнечной системы, в которой кометы и астероиды играют свою функциональную роль. Они не только почти всегда не угрожают жизни на Земле, но и поддерживают ее. В пользу этого предположения говорят новейшие данные американских геофизиков, которые свидетельствуют о решающей роли импактных процессов (периодическое падение астероидов на Землю) в периодизации изменений и поддержании устой-

чивости магнитного поля Земли. Удары космических тел регулируют магнитное динамо в ядре планеты. А магнитное поле, в свою очередь, тончайшим образом обслуживает жизненные процессы. Более того, Земля получает от метеоров много тепла, они приносят на Землю полезные элементы – иридий, титан и др., но главное в том, что они являются «посланниками дальних миров» и несут информационное познание об удаленных уголках вселенной.

К сожалению, существует и противоположное представление о роли космических воздействий. Некоторые биологи и геологи полагают, что они могут уничтожить озоновый слой Земли, способствовать землетрясениям и взрывам вулканов. Так астрономы НАСА в 2007 г. обнаружили, что к Земле движется огромное кислотное облако, из созвездия Персей. Они считают, что от него может погибнуть всё живое, как от соляной кислоты, а существующие земные технологии позволят только уменьшить опасность. По мнению астрономов, в галактике Млечный Путь имеется около 6 тыс. объектов, которые могут либо уничтожить нашу Солнечную систему, либо дать ей новый эволюционный импульс.

Солнце – сердце нашей системы, оно бережет Землю. Так в течение довольно длительного периода настоящего 24-го цикла солнечной активности вспышек не было, пятна исчезли (хотя в 23-ем цикле были сильные выбросы – высокая солнечная активность). Ученые видели чистое Солнце, значит, Земля получала меньше тепла и электромагнитной энергии, а температура всё-таки увеличивалась, и не в последнюю очередь из-за человеческого фактора.

Сейчас существуют приборы, с помощью которых можно услышать «голос Солнца». В данный период его музыка была подобна периоду минимума Маундена, который был в 17 в. Тогда происходили социальные потрясения, революции, бунты, летом была минусовая температура, замерзали реки. Однако, начиная с 6 сентября 2017 г., Солнце возобновило свою активность: последовали три сильных вспышки в сторону Земли. Солнце переходит на новый виток своего эволюционного развития.

Вирусы – это кристаллы, попадая в живую клетку, они оживают и быстро размножаются. В 2016 г. обнаружена супербактерия, на которую не действует ни один антибиотик. Бактерии имеют сознание, они используют антибиотики, приспособившись к ним, даже питаются ими. Это микротерраристы. Генетик с мировым именем, профессор П.П. Гаряев считает, что вирусы

и бактерии умные, быстро соображают и привлекают к антибиотикам.

Некоторые лаборатории, которые производили яды для лечения, сегодня стали рассадниками страшных микробов и предотвратить их размножение они не могут. В медицинских кругах считается, что вирусы СПИДа, все разновидности гриппа, вирус Эбола, и др. – это ошибки ученых. Более того, коды опасных вирусов можно найти и в Интернете, т.е. бактериологическое оружие можно создать и дома. В Америке, например, медики используют секретную информацию по сибирской язве. Новые военные технологии есть и в России. Их результаты уже ощутимы. Можно распылять газы, ампулы с бактериями в нужном месте, например, направлять их в толпы и т.д.

Наша академическая наука, наконец, согласилась с тем, что на планете происходит смена полюсов – полюса постепенно (или резко) меняются местами. Скорость их движения в данное время составляет более 50 км в год. Этот процесс происходит циклично. Ученые полагают, что Земля пережила уже более 10 таких «кувырков». В Америке «сильные мира сего» строят бункеры для спасения, но от такой катастрофы и они не помогут. Переполусовка ускорится воздействием пока научно не подтвержденной планеты «Х», вокруг которой находятся 6 тел, каждое из которых примерно в 5 раз больше нашей Земли, что может значительно ускорить процесс переполусовки.

Глобальное скоростное изменение климата (снег в тропиках, пожары, ливни, наводнения, аномальная жара, обмеления, ураганные ветры, резкая смена температур, то морозы, то оттепели, изменение атмосферных течений и т.д.). По прогнозам ученых климат и Земля должны окончательно измениться к 2040 г. Сейчас постоянно происходит что-то необычное и крупное.

Такие изменения климата были неоднократно, они неизбежны. Считается, что планета пережила шесть ледниковых периодов. Антарктида покрывалась льдом, после чего приходило потепление. Есть карты Пири Рейса и другие (15 - 16 веков), на которых Антарктида изображена безо льда.

Идет процесс повышения уровня океана, который по прогнозам достигнет 9 м. Тонут острова. Через 30 лет 2 тыс. островов уйдут под воду. Уничтожаются и горят леса, погибают растения и животные. Бассейн Черного моря от таяния ледников уже повысился на 8 см, что заметно влияет на погоду Черноморского побе-

режья.

Смещаются повсеместно климатические зоны – тундры отступают, растения приспосабливаются к новым условиям, они перемещаются, их площадь уменьшается.

Высыхают озера Северного Кавказа, количество осадков уменьшается, а температура увеличивается на 2 градуса в год.

Но это не есть *глобальное* потепление, т.к. многовековая история говорит о потеплении именно перед глобальным похолоданием. Америка и Европа усиливают запасы нефти и газа.

Резкое изменение климата – это теоретически и практически доказанный факт. Идет передел мира. По прошлым циклам скоро должно быть похолодание.

Ученые не знают, почему взрываются вулканы. Есть гипотезы о воздействии дальних миров, комет, повышенной сейсмоактивности. Особенно опасен сейчас Йеллоустонский вулкан. Его извержение может быть спровоцировано увеличением добычи сланцевых месторождений американскими компаниями.

Эти технологии способствуют землетрясениям, т.к. увеличивают подземные трещины, но зато эффективны экономически: жидкость закачивается на глубину 3 км, от чего страдает геолого-геофизическая среда, усиливается напряженность, что способствует землетрясениям и извержениям. На нашей планете 3600 дышащих вулканов.

Температура Земли зависит и от деятельности Солнца, и, по последним данным, ее в значительной степени увеличивают падающие метеориты.

Чем больше пятен на Солнце, тем больше тепла на Земле. А так как пятен долго не было, но температура в некоторых местах Земли увеличивалась, логично сделать вывод о влиянии людей на изменение климата.

Человек невежественно вторгается в космические и планетные циклы, в результате чего могут возникать климатические колебания. Такой агрессивной технократической и безнравственной человеческой деятельности на Земле еще не было. Мы уже 200 лет сжигаем топливо и нагреваем Землю, ведем яростные и жестокие войны, и своими негативными мыслями и эмоциями создаем техно-психосферу вокруг Земли, которая уже почти не пропускает жизнедеятельных космических лучей и энергий.

Земля и всё на ней разлагается и деградирует. Миллионы лет шли постоянные климатические циклы, но сейчас и они дают сбой. Увеличивается и парниковый эффект, изменяется и

резко увеличивается количество осадков (в 140 раз). Климатический коллапс может наступить уже через 30-40 лет, когда будет пройдена точка невозврата.

Прогнозируется, что к 2025 г. Земля захлебнется от перенаселения – на всех не хватит воды, еды, будет очередное вымирание, самоуничтожение, войны. Нефть будет дешевле воды. По прогнозам ученых количество переселенцев превысит 260 млн.

Экологический апокалипсис: увеличивается загрязнение земли, воды, воздуха, усиливается парниковый эффект и пожары, виды вымирают, льды уменьшаются, катастрофы усиливаются. Результаты моделирования показывают, что скоро воды вообще не будет.

Изменяются воздушные потоки от потепления, жара усилится, будут засухи, обмеление рек, а затем наступит ледниковый период. Волга уже не есть великая река, и другие реки почти пересохли. Усиливается таяние льда в Арктике и Антарктиде, много газов от пожаров выделяется в атмосферу, что сокращает количество солнечной энергии, попадающей на Землю. Прогнозируется, что Испания и Греция будут пустынями – они больше всех пострадают от глобального потепления и от недостатка воды.

Гибель коралловых рифов из-за изменения климата и потепления воды в Тихом океане. катастрофа может быть уже через 50 лет от исчезновения коралловых рифов. Волнам не обо что разбиваться. Коралловые рифы нужны для всего живого. 80% полезных микробов живут на кораллах, а теперь они уходят.

Грядущее похолодание в Европе. Прогнозируются температуры до -40 градусов. Беженцев будет некуда селить.

Метан – как одна из причин глобальных катастроф: «вечная» мерзлота будет продолжать таять, следовательно, увеличится выход метана. Он не растворяется в воде. Уже много метана в атмосфере. Это тайный враг, он невидим. В тундре образовалось множество озер. В Сибирских озёрах происходят водовороты, и выделяется много метана. Органическое вещество без углекислоты превращается в метан.

Из-за потепления «вечная» мерзлота оттаивает. На полуострове Ямал в тундре от взрыва метана уже образовался кратер высотой 80 м. Более того, последние исследования показывают, что метан может удерживать много тепла на Земле, в соответствии с увеличением углекислого газа.

Метан поднимается и из глубины океана, что установила экспедиция в Арктику в 2014 г. Идет потепление, поднимается уровень океана, увеличивается и поднятие метана вместе с бактериями.

Много городов в России построено на сваях - 60% домов в России стоят в вечной мерзлоте. При ее таянии они уходят в землю неравномерно, и дома разваливаются. Грунт уходит в землю и в Якутии, где есть и лаборатории на глубине 12 м – в вечной мерзлоте.

Для выгоды и постоянного обогащения определенных кругов выдирают полезные ископаемые из недр земли продолжается ускоренными темпами. Они не знают, что уничтожают нервы и жилы живой Земли, что они обкрадывают своих же потомков.

Но должен быть баланс, равновесие, которое Земля до определенного предела удерживает самобалансированием, а мы откачиваем нефть, газ, ископаемые, поэтому идет подтаивание. (Ученые считают, что нужно добывать полезные ископаемые на одной и той же параллели).

Ученые предполагают, что Россия уже не справляется с парниковым эффектом, леса уничтожаются или их везут в Японию и Китай, восстановительных работ не проводится, макулатура не собирается. Потеряно 1/5 лесов Амазонки, а это лёгкие планеты, исчезло 80% тропических лесов, поля уменьшаются, гибнут растения и животные.

Даже в Космосе носятся отходы человеческой деятельности. Гравитационное поле Земли неравномерно и неоднородно, оно разное в разных местах.

Движение мусора на орбитах то замедляется, то ускоряется, то меняет орбиту, что очень опасно. Он вращается уже на всех орбитах и траекториях. Земное человечество превратило свой космический дом, свою планету, в остров грязи в Солнечной системе.

О медленном перемещении магнитных полюсов ученые говорили не раз. Но о том, что и положение оси вращения может меняться, умалчивали.

Теперь, похоже, все открылось: оно действительно меняется. По крайней мере, так было 800 миллионов лет назад, когда произошло одно из смещений географических полюсов Земли. Этот удивительный факт обнаружился во время изучения магнитных полезных ископаемых в древних осадочных породах на территории Норвегии.

Ученые выяснили, что северный магнитный полюс тогда сместился сразу на 50 градусов за какие-то 20 миллионов лет. В масштабе жизни планеты это очень быстро. Поэтому и понадобилась "перебалансировка" земного шара относительно быстрого смещение оси вращения.

Но в чем причина таких явлений? Оказывается, они могут начаться из-за нарушения равновесия масс в мантии, или из-за роста супервулкана вдали от экватора, или ускориться негативными энергиями человеческих мыслей.

Подобное смещение рассматривалось в "Тайной Доктрине" Е.П. Блаватской как величайшее в истории Земли событие, резко отделяющее один эволюционный этап, или период, от другого и сопровождающееся значительными планетными катаклизмами.

### Заключение

Исходя из вышеизложенного и учитывая новые открытия в естествознании, следует признать, что источником большинства катастроф и стихийных бедствий и болезней на Земле являются несправедливые войны, смуты, нарастающая бездуховность и аморальность человечества.

Одной из главных причин экологических проблем является несоизмеримость потребления человечества с реальными возможностями нашей планеты.

Промышленная революция и технократическое давление на природу Земли и ближний космос явились новым дополнительным экологическим и климатическим фактором, экспериментом над планетой, усиливающим глобальное потепление, наводнения, ураганы, тайфуны, пожары и прочие негативные энергоактивные явления.

Процесс эскалации стихийных и катастрофических явлений превращается в начале третьего тысячелетия нашей эры в особо значимую закономерность текущего развития планетарной жизни.

В последние десятилетия выявлена растущая напряженность и по социальным показателям, что показывает необходимость срочной выработки основных рекомендаций для смягчения последствий неуравновесий природы и хотя бы частичной нейтрализации влияния техногенной составляющей хозяйственной деятельности человека на состояние планеты и жизнедеятельность ее населения.

Усиливающиеся катастрофические явления наглядно показывают, что существующие детерминистические подходы прогнозирования стихийных бедствий, техногенных аварий и катастроф еще не имеют достаточных фундаментальных основ для однозначного формирования критериев краткосрочного прогноза, а вероятностно-стохастические методы прогнозирования, являющиеся в большинстве случаев чисто «феноменологическими», не всегда оправдываются.

Особенность нашей эпохи в том, что современное человечество способно активно влиять на стихийные проявления, направляя их в созидательное русло. Коллективное человеческое мышление неизмеримо выросло и представляет, по Вернадскому, мощную геологическую силу.

Планетарные катастрофы могут усиливаться негативным воздействием на природные процессы людей, так как человечество, заняв к настоящему времени целую сферу Земли, названную ноосферой, способно своей техногенной деятельностью вызывать стихийные природные явления.

Масштабные природные катаклизмы, циклично происходящие на планете, уже неоднократно случались в истории Земли и человеческой цивилизации, но большинство современных ученых не извлекли из этих научных знаний, свидетельствующих о былых всеобщих планетарных трагедиях, никаких уроков. Как известно, они судят о возникновении тех или иных явлений, анализируя имеющиеся данные наблюдений и экспериментов.

Например, в метеорологии ученые сначала визуально наблюдают за облаками, пользуются спутниковыми и другими данными и делают выводы по следствиям уже произошедших в невидимом мире физических явлений, поэтому выводы учёных в большинстве случаев носят характер предположений, а не точных знаний глубинных причин зарождения данных явлений.

К счастью, на сегодняшний день развитие теоретической и прикладной физики, включая новую физику вакуума и формирующееся фундаментально новое понимание физических процессов и явлений, происходящих в живой и «неживой» природе, даёт шанс человечеству на эволюционный прорыв в разных направлениях науки.

Скоростное преобразование климата Земли, а также геомагнитная переполусовка поставили перед всеми формами жизни жесткую задачу адаптации.

Чтобы понять происходящее, необходим не только комплексный подход к имеющимся научным представлениям о жизни (происхождение, поддержание, модификация), но требуется и фундаментальное концептуальное обновление в попытках изучить и понять адаптацию и стратегию феномена жизни в экстремальных условиях.

### Список литературы

1. Альберт Гор, ООН, климат и проблема-2000, – Zarodinu.org.ua.
2. Арманд А.Д., Жерихин Д.И. и др. Анатомия кризисов. - М.: Наука, 1999. - 238 с.
3. Владимирский Б.Н. Гелиобиология в наши дни. - Симферополь: Таврия, 2003. - 238 с.
4. Дмитриев А.Н. Планетофизическое состояние Земли и Жизнь // Вестник МНИИКА. Новосибирск. - 2009, вып.4, с. 45-55.
5. Электромагнитные поля в биосфере. Т. I. - Электромагнитные поля в атмосфере Земли и их биологическое значение. - М.: Наука, 1984. - 375 с.
6. Кузин А.М. Электромагнитная информация и явление жизни // Биофизика. – 2000, т.45, вып.1, с.144.
7. Казначеев В.П. Космогеофизическое пространство, живое вещество и природа интеллекта человека // Новосибирск, Вестник МНИИКА. – 2010, вып. 19, с.153-162.
8. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. - М.: Наука. - 1991, 382 с.
9. Дмитриев А.Н., Шитов А.В. Техногенное воздействие на природные процессы Земли. Проблемы глобальной экологии. - Новосибирск: Манускрипт, 2008. – 140 с.
10. Живая Этика. – М.: МЦР, 1995 -2001. – 2793 с.
11. Николаев А.В. Черты геофизики XXI века. В Сб. Проблемы геофизики XXI века: В 2 кн. / Отв. А.В. Николаев. – М.: Наука, 2003. – 311 с.
12. Рерих Е.И. У порога Нового Мира. - М.: МЦР, 2002. – 464 с.
13. Delgado J.M.R. Biological effects of extremely Low frequency, Electromagnetic fields. Biomagnetism Application and Theory. Pergamon-Press. 1995. - 455 p.

### References

1. Al Gore, UN, the climate and the problem-2000, - Zarodinu.org.ua.
2. Armand A.D., Zherikhin D.I. Anatomy of Crises. – M.: Nauka, 1999. - 238 p.
3. Vladimirovsky B.N. Heliobiology in our days. - Simferopol: Tavria, 2003. - 238 p.
4. Dmitriev A.N. Planetophysical state of the Earth and Life // Vestnik MNIICA. Novosibirsk. - 2009, issue 4, p. 45-55.
5. Electromagnetic fields in the biosphere. T. I. - Electromagnetic fields in the Earth's atmosphere and

- their biological significance. – M.: Nauka, 1984. - 375 p.
6. Kuzin A.M. Electromagnetic information and the phenomenon of life // Biophysics. - 2000, vol. 45, issue 1, p.144.
  7. Kaznacheev V.P. Cosmogeophysical space, living matter and the nature of the human intellect // Vestnik MNIKA. Novosibirsk. - 2010, no. 19, p.153-162.
  8. Vernadsky V.I. Scientific thought as a planetary phenomenon. – M. Nauka. - 1991, 382 p.
  9. Dmitriev A.N., Shitov A.V. Technogenic impact on the natural processes of the Earth. Problems of global ecology. - Novosibirsk: The Manuscript, 2008. - 140 p.
  10. Living Ethics. – M.: MCR, 1995 -2001. - 2793 p.
  11. Nikolaev A.V. Features of geophysics of the XXI century. In the Sat. Problems of geophysics of the XXI century: In 2 books / Resp. A.V. Nikolaev. – M.: Nauka, 2003. - 311 p.
  12. Roerich E.I. At the threshold of the New World. – M.: MCR, 2002. - 464 p.
  13. Delgado J.M.R. Biological effects of extremely Low frequency, Electromagnetic fields. Biomagnetism Application and Theory. Pergamon-Press. 1995. - 455 p.

**ISSN 2413-5526**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»  
Том 3 № 4**

**SCIENTIFIC MAGAZINE  
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»  
Vol. 3 No 4**

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

Адрес редколлегии:  
ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация  
E-mail [nauchnyyzhurnal@mail.ru](mailto:nauchnyyzhurnal@mail.ru)  
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова, А.А. Чуклин*

---

Подписано к печати 27.12.2017. Изд. № 92/17. Зак. 59/17. Тираж 65 экз.  
Объем 20,5 п.л. Усл. печ. л. 19,06. Уч.-изд. л. 20,09. Формат бумаги 60 x 84 1/8

---

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»