

**ISSN 2413-5526**

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ**

**«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

# **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ**

**Научный журнал**

**Т. 7 № 3**

**Севастополь  
2021**

**Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2021. – Т. 7. - № 3. – 108 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>5</b>   |
| <i>Качур С.А.</i> Проблемы безопасной эксплуатации реакторных установок                                                                                                        | 5          |
| <i>Качур С.А., Давиденко Е.Н.</i> Модель функционирования бортовых систем космического аппарата в комплексе с реакторной установкой на основе сетей Петри                      | 15         |
| <i>Кузнецова Н.И., Карнаушенко Д.В., Дельцов М.М.</i> Анализ и диагностика утечек газов на АЭС                                                                                 | 21         |
| <b>Автоматизация процессов контроля и управления</b>                                                                                                                           | <b>30</b>  |
| <i>Исаев А.В., Матузаева О.В., Максимов С.В., Назаркин А.А.</i> Использование свёрточных нейросетей для идентификации структур металлов и сплавов при микроструктурном анализе | 30         |
| <i>Качур С.А.</i> Совершенствование систем внутриреакторного контроля реакторов типа ВВЭР на основе оптических систем                                                          | 37         |
| <i>Кузнецова Н.И., Дельцов М.М., Карнаушенко Д.В.</i> Анализ спектральных методов контроля износа деталей энергетического оборудования                                         | 45         |
| <b>Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии</b>                                                                                                                       | <b>50</b>  |
| <i>Зайченко В.М., Кувишинов В.В., Сухенко А.К., Бордан Д.Ф., Жиганов И.Г.</i> Возможности аккумулирования электрической энергии                                                | 50         |
| <i>Сухенко А.К., Якимович Б.А., Кувишинов В.В., Бордан Д.Ф., Нашев Р.А.</i> Методы тестирования наземных фотоэлектрических модулей                                             | 56         |
| <i>Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Власов Н.А., Бордан Д.Ф., Нашев Р.А.</i> Перспективы развития малой ветроэнергетики в Российской Федерации                                   | 64         |
| <i>Кувишинов В.В., Какушина Е.Г., Бордан Д.Ф., Жиганов И.Г., Ивантеев И.А.</i> Производство тепловой и электрической энергии на основе мусороперерабатывающих комплексов       | 70         |
| <b>Экологическая безопасность</b>                                                                                                                                              | <b>78</b>  |
| <i>Заблоцкая Е.В., Горблянская А.С., Тищенко Т.Н.</i> Проблема утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления в Республике Крым                                | 78         |
| <i>Кучерик Г.В., Гричаная В.Д., Омельчук Ю.А., Сытников Д.М.</i> Возможность использования карьерных вод в качестве источников питьевого водоснабжения г. Севастополя          | 85         |
| <i>Кучерик Г.В., Гонтаренко Д.В., Омельчук Ю.А., Сытников Д.М., Флерко О.В.</i> Оценка токсичности жидких отходов производства соды и перспективы их утилизации                | 97         |
| <b>Для авторов</b>                                                                                                                                                             | <b>106</b> |

---



---

## CONTENTS

---



---

|                                                                                                                                                                                         |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Thermal and nuclear power plant</b>                                                                                                                                                  | <b>5</b>   |
| <i>Kachur S.A.</i> Problems of safe operation of reactor installations                                                                                                                  | 5          |
| <i>Kachur S.A., Davidenko E.N.</i> Model of the functioning of the onboard systems of the spacecraft in combination with a reactor installation based on Petri nets                     | 15         |
| <i>Kuznetsova N.I., Karnaushenko D.V., Del'tsov M.M.</i> Analysis and diagnostics of gas leaks at nuclear power plants                                                                  | 21         |
| <b>Process automation and control</b>                                                                                                                                                   | <b>30</b>  |
| <i>Isaev A.V., Matuzaeva O.V., Maximov S.V., Nazarkin A.A.</i> Using convolutional neural networks to identify structures of metals and alloys in microstructural analysis              | 30         |
| <i>Kachur S.A.</i> Improvement of in-reactor control systems for VVER-type reactors based on optical systems                                                                            | 37         |
| <i>Kuznetsova N.I., Del'tsov M.M., Karnaushenko D.V.</i> Analysis of spectral methods for monitoring the wear of parts of the power equipment                                           | 45         |
| <b>Alternative and renewable energy sources</b>                                                                                                                                         | <b>50</b>  |
| <i>Zaichenko V.M., Kuvshinov V.V., Sukhenko A.K., Bordan D.F., Jiganov I.G.</i> Possibilities for storing electrical energy                                                             | 50         |
| <i>Sukhenko A.K., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., Bordan D.F., Nashev R.A.</i> Methods for testing ground photoelectric modules                                                        | 56         |
| <i>Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Vlasov N.A.</i> Prospects for the development of small-scale wind power in the Russian Federation                                                    | 64         |
| <i>Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Bordan D.F., Zhiganov I.G., Ivanteev I.A.</i> Production of heat and electric energy on the basis of waste processing complexes                      | 70         |
| <b>Environmental Safety</b>                                                                                                                                                             | <b>78</b>  |
| <i>Zablotskaya E.V., Gorblyanskaya A.S., Tishchenko T.N.</i> The problem of utilization and neutralization of production and consumption waste in the Republic of Crimea                | 78         |
| <i>Kucherik G.V., Grichanaya V.D., Omelchuk Yu.A., Sytnikov D.M.</i> Possibility of using quarry water as a source of drinking water supply for the city of Sevastopol                  | 85         |
| <i>Kucherik G.V., Gontarenko D.V., Omel'chuk Yu.A., Sytnikov D.M., Flerko O.V.</i> Evaluation of the toxicity of liquid waste from soda production and the prospects for their disposal | 97         |
| <b>For cars</b>                                                                                                                                                                         | <b>106</b> |

## ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

### Проблемы безопасной эксплуатации реакторных установок

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur\_62@mail.ru

Статья поступила 07.06.2021 г.; после доработки 09.06.2021 г.

#### Аннотация

*Проведен анализ наиболее опасных аварий для реакторных установок. Определены проблемы диагностики нарушения процесса теплообмена в активной зоне реактора*

**Ключевые слова:** безопасность, реакторная установка, диагностика, теплообмен, авария.

### Problems of safe operation of reactor installations

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur\_62@mail.ru

Received 07.06.2021 y.; received in final form 09.06.2021 y.

#### Abstract

*The analysis of the most dangerous accidents for reactor installations is carried out. The problems of diagnostics of the violation of the heat exchange process in the reactor core are determined*

**Keywords:** safety, reactor plant, diagnostics, heat exchange, accident.

#### Введение

Одной из наиболее характерных черт энергетики в настоящее время является комплексная автоматизация технических средств. Совершенствуется элементная база автоматики, интенсивно внедряется вычислительная техника. Вместе с тем объекты автоматизации (например, энергетические установки электростанций) до сих пор совершенствуются по законам, которые только для отдельных систем учитывают влияние уровня, степени и вида автоматизации. Отсюда возможны излишняя сложность или, напротив, упрощение управляющей и контролирующей систем и слабая приспособленность объектов к контролю (или идентификации) и управлению. Создаются предпосылки чрезмерной перегруженности средствами автоматизации и повышенной аварийности, с одной стороны, и понижения живучести управления энергетическими

комплексами – с другой. Эта проблема актуальна для сложных систем различного назначения [1].

Объем и характер задач, выдвигаемых в настоящее время перед ядерной энергетикой требует не частичных улучшений, а крупных комплексных мер, которые бы определяли дальнейший качественный скачок в ее развитии. Такая перестройка возможна только на основе внедрения перспективных проектов РУ АЭС и прогрессивных технологий их эксплуатации.

Тяжелые аварии на ТМА-2 в США, на Чернобыльской АЭС и Фукусима-II привели к осознанию обеспечения в дальнейшем необходимого высокого уровня безопасности АЭС и их работы в условиях допустимого и контролируемого риска безопасности. Многие из инцидентов на АЭС не были связаны с какой-либо опасностью для персонала и населения, однако обладали не

столько потенциальными возможностями более сложного развития событий при дополнительных отказах оборудования или ошибках персонала, сколько экономическими потерями.

Статистические данные по всем АС мира показывают, что 12,4% от общего количества были связаны с отказами ядерной частью АЭС, включая топливо, средства контроля и системы безопасности. На фоне отказов оборудования и автоматики неблагоприятному развитию событий способствуют неправильные действия операторов.

Одним из наиболее перспективных путей повышения безопасности, который позволяет обеспечить самоорганизацию и живучесть АЭС, является создание систем управления на основе принципов искусственного интеллекта. АЭС относятся к классу систем с переменной случайной структурой на множестве стохастических элементов, для которых набор структур не определен. Такой класс систем требует дальнейшего развития нестандартных моделей и методов, в частности, математического аппарата, отличного от дифференциальных, интегральных или функциональных уравнений. Следует отметить необходимость участия человека-оператора в звеньях обеспечения работоспособности таких систем. Это требует дальнейшего развития моделей и методов, которые основаны, в том числе, на использовании теорий искусственных нейронных сетей и сетей Петри.

Система интеллектуального управления сложными стохастическими процессами должна иметь высокую моделирующую способность. Таким образом, возникает задача выбора и усовершенствования математического аппарата для описания системы управления и объекта управления. Максимальная мощность моделирования присуща машине Тьюринга. Расширение сетей Петри эквивалентно машине Тьюринга, однако недостатком сетей Петри являются слабые возможности их структуризации, поэтому необходимо таким образом усовершенствовать аппарат сетей Петри, чтобы возможность изменения структуры модели была предусмотрена на уровне математического аппарата.

Дальнейший прогресс в разработке ядерных реакторов для АЭС характеризуется увеличением единичной мощности, что достигается, с одной стороны, увеличением размеров активной зоны, с другой — повышением удельной мощности. Большие размеры активной зоны усложняют контроль и регулирование распределения мощности по объему активной зоны. Работа при высокой удельной мощности создает тенденции

приближения значений технологических параметров, обеспечивающих нормальную эксплуатацию твэлов, и других элементов активной зоны к предельным значениям.

Цель исследования — анализ аварий с выходом радиоактивных веществ и подходов к диагностике кризиса теплообмена в активной зоне реактора.

### **Анализ основных аварийных процессов на АЭС**

Наиболее опасной аварией для РУ АЭС является авария с выходом радиоактивных веществ. Поэтому основное внимание по обеспечению безопасности АЭС уделяется аварийным процессам, описание которых представлено в таблице [2, 3].

Анализ аварий показывает, что защиту персонала и населения от радиоактивного поражения необходимо обеспечивать даже в случае маловероятных аварий. При таких авариях возможно разрушение топлива, плавление активной зоны, разрушение герметичной защитной оболочки, что должно приводить к значительным выбросам радиоактивных веществ.

### **Проблемы диагностики нарушения процесса теплообмена в активной зоне реактора**

В ядерном реакторе имеется возможность возникновения условий, при которых происходят превышения установленного уровня мощности или превышения скорости разгона. Опасность кризиса теплообмена общеизвестна — перегрев защитной оболочки вследствие резкого увеличения температуры поверхности нагрева оболочки твэла с последующим выходом продуктов деления в контур [2].

Для реакторов типа ВВЭР представляет опасность кризис теплообмена первого рода, который обусловлен переходом пузырькового кипения в пленочное и наблюдается, как правило, при довольно высоких удельных тепловых потоках. Характерной величиной в данном случае является критический тепловой поток, определение которого при различных условиях представляет практический интерес [2, 4].

В динамике проявление кризиса первого рода наиболее вероятно в ситуациях, связанных с превышением локального либо интегрального энерговыделения по активной зоне реактора. Механизмы кризиса теплообмена в каналах в значительной мере определяются режимами тече-

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

**Таблица.** Наиболее опасные аварийные процессы РУ АЭС

| Наиболее опасные аварийные процессы                                | Возникновение и протекание аварийного процесса                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|--------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Неуправляемый рост мощности активной зоны (изменение реактивности) | а) неконтролируемое извлечение регулирующих стержней из активной зоны; б) повреждение ТВС; в) всплытие ТВС в потоке теплоносителя на разуплотненном реакторе; г) радиальное смещение ТВС; д) образование пустот в натриевом теплоносителе; е) изменение температуры теплоносителя и замедлителя                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| Уменьшение расхода теплоносителя через активную зону               | а) рост давления и, как следствие, опасность разрушения системы первого контура при отказе предохранительных устройств; б) рост температуры теплоносителя, и тогда реальным является разрушение первого барьера безопасности — твэлов; в) комбинация возмущений: опасный рост температуры твэлов и рост давления в первом контуре, что приводит к возможности разрушения сразу двух барьеров безопасности и плавления активной зоны; г) несоответствие между вырабатываемым и отводимым теплом возникает в случаях потери внешней нагрузки, прекращения подачи питательной воды в ПГ, разрыва паропровода, остановки ГЦН из-за их поломки или при полном обесточивании, блокировки проходного сечения одной или нескольких ТВС. |
| Потеря теплоносителя первого контура                               | а) разрыв по полному сечению трубопровода первого контура с максимальным диаметром, что создает угрозу разрушения всех барьеров защиты; б) разрыв трубопровода системы охлаждения реактора или образование настолько большой течи, что система подпитки не способна восполнить утечку.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Рост давления в первом контуре; межконтурные течи                  | для защиты от превышения давления при авариях применяются предохранительные клапаны (ПК) и быстродействующие редуционные установки (БРУ); установка ПК на контуре с радиоактивным теплоносителем увеличивает вероятность аварии с потерей теплоносителя из-за возможности ложных срабатываний этих клапанов и их неполадки после срабатывания.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |

Между всеми механизмами кризиса нет резких границ, и есть области одновременного влияния двух или более механизмов. В связи с этим интерпретация опытных данных и форма описания их эмпирическими уравнениями вызывают определенные трудности.

Традиционным является представление опытных данных в координатах  $q_{кр}(x_{кр})$  или  $N_{кр}(i_{вх})$  (где  $q_{кр}$  — критическая плотность теплового потока,  $x_{кр}$  — критическое массовое паросодержание,  $N_{кр}$  — критическая мощность,  $i_{вх}$  — энтальпия на входе). Если последняя зависимость включает первичные данные эксперимента, то при переходе к зависимости  $q_{кр}(x_{кр})$  необходимо вычислить из уравнения теплового баланса  $x_{кр}$ , что сопряжено с дополнительными ошибками.

Активные зоны реакторов крупных АЭС имеют сложные структуры с большим количеством тепловыделяющих сборок и регулирую-

щих органов, работающих в напряженных условиях.

Для решения задачи оптимизации энерговыделения в таких активных зонах и повышения экономности работы АЭС потребовалась разработка специальных средств и устройств автоматики, обеспечивающих контроль и управление такими ядерными реакторами [5-8].

В общем случае необходимые сигналы и установки срабатывания АЗ обосновываются расчетными и экспериментальными исследованиями и зависят от типа реактора. Часто параметры, определяющие безопасность реакторной установки, невозможно прямо измерить. К таким параметрам относятся: температура топлива и оболочек, положение наиболее «горячей» точки, место закипания и т.д. В этом случае необходимо на основании физических и теплотехнических расчетов определить безопасные области изменения измеряемых параметров, а

также установки АЗ для каждого из этих параметров.

Запаздывание срабатывания АЗ по отношению к моменту появления аварийной ситуации определяется инерционным запаздыванием измерительных приборов, запаздыванием при прохождении сигнала в логической схеме и особенно механическим запаздыванием при введении аварийных стержней [9].

Описание функционирования АЭУ при локальных возмущениях как случайного процесса, основными показателями которого в режиме предельных тепловых нагрузок являются параметры поверхностного кипения, а именно, давление теплоносителя, температура теплоносителя в камере смешения, среднее объемное паросодержание [2], позволяет использовать в качестве основы адаптивных систем управления стохастические модели.

Рассмотрим некоторые из существующих эмпирических моделей описания процесса теплообмена в активной зоне реактора.

Гидродинамические расчеты в ядерной энергетике связаны с течениями в каналах [4]. Течение теплоносителей в активной зоне ядерных реакторов, теплообменников, парогенераторов практически всегда носит турбулентный характер.

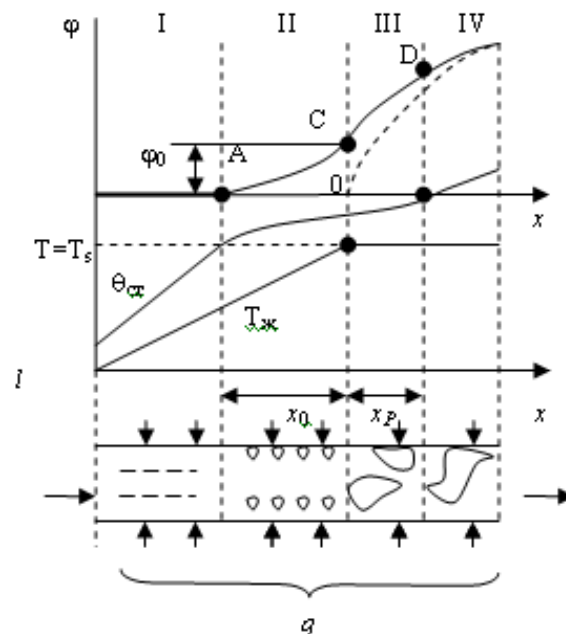
В условиях работы каналов активной зоны реактора и парогенераторов при значениях относительной энтальпии, близких к нулю или единице, двухфазный поток при подводе тепла может быть термодинамически неравновесным. Пар может присутствовать в жидкости, которая в среднем недогрета до температуры насыщения (массовое расходное паросодержание  $x < 0$ ). В закризисной зоне пар может быть перегрет, несмотря на присутствие влаги. Эти обстоятельства усложняют точные расчеты таких режимов. Поэтому используются эмпирические соотношения для описания гидродинамики и теплообмена в таких потоках.

Превышение температуры нагреваемой поверхности, погруженной в жидкость или омываемой жидкостью, над температурой насыщения на определенную величину ( $\Delta t_{\text{нк}}$ ) приводит к образованию пара на поверхности (кипению жидкости). Значение  $\Delta t_{\text{нк}}$ , при которой начинается кипение, зависит от большего количества факторов (давления, скорости движения жидкости, недогрева, материала поверхности, ее шероховатости, краевого угла смачиваемости, количества растворимых в жидкости газов и т. д.). В общем виде  $\Delta t_{\text{нк}}$  не определяется.

В зависимости от плотности теплового потока и ряда других факторов на поверхности нагрева образуются или отдельные паровые пузыри, или сплошной слой пленки пара, и кипение называется пузырьковым или пленочным. Кроме того, кипение различается по типу конвекции (кипение при свободной конвекции в большом объеме и кипение при вынужденной конвекции) и по отношению средней температуры жидкости  $T_{\text{ж}}$  к температуре насыщения  $T_{\text{с}}$  (кипение жидкости недогретой до температуры насыщения — поверхностное кипение при  $T_{\text{ж}} < T_{\text{с}}$  и кипение жидкости, догретой до температуры насыщения при  $T_{\text{ж}} \approx T_{\text{с}}$ ).

Пузырьковое кипение [10, 11] может быть развитым (при большом количестве центров парообразования) и неразвитым (при малом количестве центров парообразования). В последнем случае значительная доля тепла снимается конвекцией жидкости.

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



**Рис. 1.** Парогенерирующий канал. Параметры:  $T_{\text{ж}}$  — температура жидкости;  $T_{\text{с}}$  — температура кипения при данном давлении;  $\theta_{\text{ст}}$  — температура стенки ТВЭЛ;  $\varphi$  — истинное паросодержание;  $x$  — массовое паросодержание (относительная энтальпия);  $q$  — удельный тепловой поток;  $l$  — длина канала.

На начальном участке (область I) течение имеет конвективный характер, свойственный для функционирования каналов активной зоны реакторов типа ВВЭР. Область II представляет

собой режим поверхностного кипения, характеризующийся следующими термодинамическими условиями:  $T_{ж} < T_s$ ,  $\theta_{ст} \geq T_s$ . На этом участке паровые пузырьки образуются на поверхности нагрева, проникают в поток и конденсируются в его ядре. Истинное объемное паросодержание (кривая АС) лежит в области отрицательных значений  $x$ . Дальнейшее движение теплоносителя по его течению приводит к объемному кипению, которое имеет место при термодинамических условиях  $T_{ж} = T_s$ ,  $\theta_{ст} > T_s$  (область III). Этот режим характерен для ядерных реакторов кипящего типа на испарительном участке активной зоны. Четвертая область кипения (область IV) представляет собой кризисный участок кипения, на котором установлены термодинамические условия  $T_{ж} = T_s$ ,  $\theta_{ст} >> T_s$ . Данная область и соответствующий ей режим является недопустимым для нормальной эксплуатации ядерного реактора.

В соответствии с результатами исследований, изложенными в [4]:

для области I  $x < x_0$ ,  $\varphi = 0$ ;

для области II  $x_0 < x < 0$ ,

$$\varphi = \varphi_0 (1 - x / x_0)^{1,35}; \quad (1)$$

для области III  $0 < x < x_p$ ,

$$\varphi = \varphi_0 + \frac{x}{x_p} (\varphi_p - \varphi_0); \quad (2)$$

для области IV  $x > x_p$ ,  $\varphi = \varphi_p$ .

В формулах (1) и (2)

$$\varphi_0 = 1,17 q^{0,35} / p^{0,15} (\rho w)^{0,15};$$

$$x_0 = -0,573 q^{0,7} (p / \rho w)^{0,3};$$

$$x_p = [1 + (p' / p'')(1 - \beta_p) / \beta_p]^{-1};$$

$$\varphi_p = [1 + s(1 - \beta_p) / \beta_p]^{-1};$$

$$\beta_p = 0,322 (p / r p w^{0,2});$$

$$s = 1 + 2,27 (1 - \pi)^2 (\rho' / \rho w)^{0,7};$$

$$\pi = p / p_{кр};$$

где  $p = 0,5 \div 10$  МПа – давление;  $\rho w = 100 \div 3600$  кг/(м<sup>2</sup> · с) – массовая скорость;  $q = 0,2 \div 2$  МВт/м<sup>2</sup> – удельный тепловой поток;  $r$  – теплота испарения;  $s$  – коэффициент скольжения;  $\beta$  – объемное расходное паросодержание;  $\rho'$  и  $\rho''$  – плотность жидкости и плотность пара соответственно.

На основании системного анализа физических моделей кризисных явлений при кипении в двухфазном потоке четыре основные модели, трактующие физические условия возникновения кризиса теплоотдачи с различных, суще-

ственно отличающихся друг от друга позиций, в работе [12] сформулированы следующим образом:

1. Гидродинамическая модель кризиса теплоотдачи, впервые предложенная С. С. Кутателадзе для условий кипения жидкости при ее свободном движении. В основу этой физической модели, получившей широкую известность и дальнейшее развитие в ряде работ, положен эффект вытеснения жидкости из двухфазного пристенного слоя потоком пара, генерируемого на обогреваемой теплоотдающей поверхности. Этот модельный подход не дает возможности объяснить ряд известных экспериментальных фактов. В их числе, например, результаты И. П. Смогалева, согласно которым значение  $q_{кр}$  при кипении в большом объеме может превышать величину этого параметра в условиях вынужденного движения теплоносителя с малыми скоростями.

2. Тепловая модель кризисных явлений, впервые предложенная Г. Я. Кружилиным, а также физически близкие к ней модельные представления В. И. Толубинского. В основу этой концепции кризиса теплоотдачи положено явление предельного насыщения двухфазного пристенного слоя в предкризисной области центрами парообразования, а также баланс интенсивностей процесса подвода тепла к пристенному паровому пузырю и отвода тепла от него в ядро потока.

3. Термодинамическая модель В. П. Скрипов, исходящая из предположения о связи кризиса теплоотдачи с потерей термодинамической устойчивости двухфазного пристенного слоя при достижении превышения величиной критического перегрева жидкости температуры ее метастабильного состояния.

4. Предложенная В.В. Яговым модель трансформации структуры двухфазного пристенного слоя в области тепловых потоков, непосредственно предшествующих  $q_{кр}$ , связывающая развитие кризисных явлений на теплоотдающей поверхности с процессом формирования нестабильных паровых пленок, возникающих над локальными сухими пятнами на теплоотдающей поверхности. Эти модельные представления концептуально близки тепловой модели кризиса теплоотдачи Г. Н. Кружилина, корреспондируются с физическими представлениями В.И. Толубинского, а также соответствуют общему подходу к оценке этого явления, предложенного У.М. Резеновым.

Для решения задач безопасности АЭС, в том числе связанных с локальной верификацией

критического теплового потока (КТП) в ТВС водоохлаждаемых ЯР, используются теплогидравлические коды улучшенной оценки: RELAP-5, TRAC (США), ATHLET (Германия), THYDE (Япония), CATHENA (Канада), CATHARE (Франция), CORSAR (Россия) [12, 13]. В проблеме повышения точности оценок КТП при численном анализе аварийной динамики реакторных установок определяющим является следующий факт. Расчеты кризисов теплоотдачи в каналах водоохлаждаемых ЯР во всех версиях наиболее совершенных зарубежных кодов до настоящего времени реализуется на основе эмпирических соотношений, полученных в экспериментах только с цилиндрическими каналами. Согласно оценкам, выполненным [14-16] это обстоятельство предопределяет получение существенно завышенных расчетных данных по КТП при аварийных пониженных режимных параметрах ЯР.

Анализ эффективных подходов к решению задачи безопасности ЯР на основе верификации экспериментальных корреляций для расчета КТП в ТВС водоохлаждаемых ЯР с использованием версий тепло динамических кодов RELAP-5/ MOD 3 позволил определить следующий важный следующий аспект этой проблемы. Разработка методологии локальной верификации базовых физических моделей и корреляций аварийных теплогидравлических процессов, в первую очередь, кризиса теплоотдачи при кипении тесно, взаимосвязана с другой актуальной для практики эксплуатации водоохлаждаемых реакторов проблемой: автоматическим распознаванием кризиса теплоотдачи в парогенерирующих каналах на основе анализа флуктуаций режимных параметров процесса теплообмена. Согласно [17-19] надежная идентификация кризиса теплоотдачи, а также любой другой теплогидравлической аномалии (например, начала кипения для реакторов некипящего типа) должна быть надежно обеспечена в условиях, когда существующими контрольно-измерительными средствами эти тепло гидравлические режимы принципиально не могут быть обнаружены. В [20] например, отмечается, что разработка методов раннего обнаружения аварийных теплогидравлических процессов в ТВС на основе шумовой диагностики ЯР, является одной из наиболее важных проблем, подлежащих решению при создании диагностических компьютерных систем на основе методологии ИИ в структуре технических средств поддержки оператора (СПО) АЭС нового поколения.

В контексте сформулированных задач в работе [21] предложен подход к комплексному решению диагностических и верификационных задач. При этом алгоритм идентификации нижней границы пузырьковой структуры двухфазного потока в ТВС, рассмотренный в [21], разработан в качестве диагностического модуля специализированной ЭС [22], которая предназначена для функционирования в структуре перспективного компьютерного комплекса СПО АЭС.

Исходя из диагностической концепции, изложенной в [22], а также с учетом особенностей верификации КТП в ТВС водоохлаждаемых ЯР необходимо обратить внимание на следующее принципиальное обстоятельство. В настоящее время можно считать установленным, что нарушения эксплуатационных режимов в оборудовании ядерных энергоблоков и их аномальные эксплуатационные режимы, включая аварийные теплогидравлические процессы в ТВС, в первую очередь, кризисы теплоотдачи на поверхности ТВЭЛ являются вероятностными физическими явлениями, причем флуктуационные составляющие сигналов режимных параметров процесса теплообмена (давления, температуры, расхода и др.) являются стохастическими процессами. Следовательно, решение задачи идентификации тех случайных процессов и объектов, которые характеризуют параметры этих нарушений, принципиально может быть обеспечено на основе методов распознавания, разработанных на основе концепции ИИ [22-25].

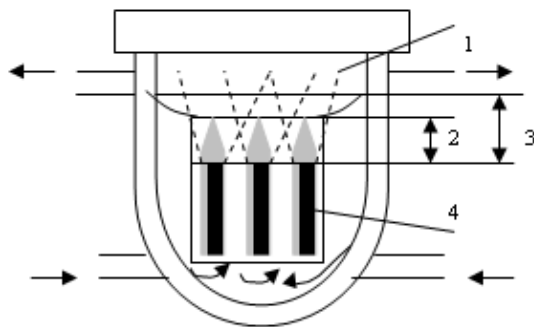
Интересное решение задачи идентификации стадий процесса кипения в пучках стержней предлагается в работе [12], а именно использование ИНС Хемминга, принимая в качестве входной информации параметры автоспектральной плотности акустического шума. Однако в этом случае необходимо иметь образец рассматриваемых стадий процесса кипения, который не может быть однозначно описан в условиях неопределенности. Кроме того, правильность идентификации ситуации зависит от размерности ИНС, что в свою очередь влияет на быстродействие и скорость принятия решения. Поэтому такой подход не целесообразно применять для идентификации по всему множеству ТВС ЯР.

Вопросы анализа неопределенности результатов, полученных при проведении детерминистических обоснованиях безопасности РУ, рассмотрены в [26-29]. Использование интегральных компьютерных кодов (RELAP-5 [30])

не позволяет полностью говорить о корректности полученных результатов из-за наличия неопределенности компьютерного кода и расчетной модели, а также неопределенности начальных условий. Необходимость новых теплогидравлических исследований и разработки расчетных кодов нового поколения обоснована в [11, 31].

Задача идентификации недопустимого по проекту режима поверхностного кипения в каналах активной зоны в реакторах типа ВВЭР была рассмотрена при проведении эксперимента на исследовательском ядерном реакторе ИР-100 [32, 33].

Гидродинамика теплоносителя в камере смешения ядерного реактора, расположенной над активной зоной, схематично представлена на рис.2 [34].



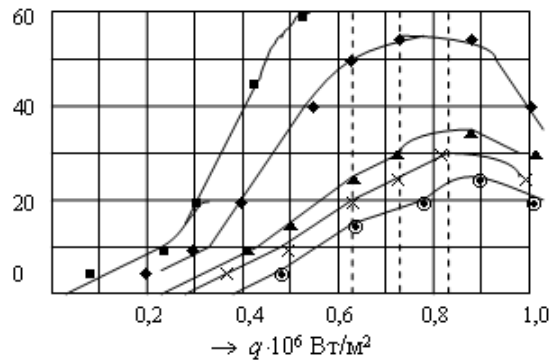
**Рис. 2** Схема течения теплоносителя в верхней камере смешения реактора: 1 – камера смешения; 2 – ядра струйного течения,  $L_1$ ; 3 – основной участок струй,  $L_2$ ; 4 – ТВС активной зоны.

Из схемы течения параллельных струй в верхней камере смешения рис. 2 следует, что именно здесь потоки из каналов активно перемешиваются. Причем перемешивание происходит на расстоянии  $L_2$ , на котором пограничные слои пересекаются в пространстве камеры смешения. С точки зрения качества потока теплоносителя в камере смешения, над активной зоной происходит поперечный перенос количества движения за счет обмена конечными массами (молями) между каналами.

Рассмотрим более подробно экспериментальное исследование поверхностного кипения в исследовательском канале, проведенный И.А.Поповым. Исследование выполнено в кольцевом канале, вмонтированном в центральный экспериментальный канал исследовательского ядерного реактора ИР-100. Детектирование кипения в канале осуществляется акустиче-

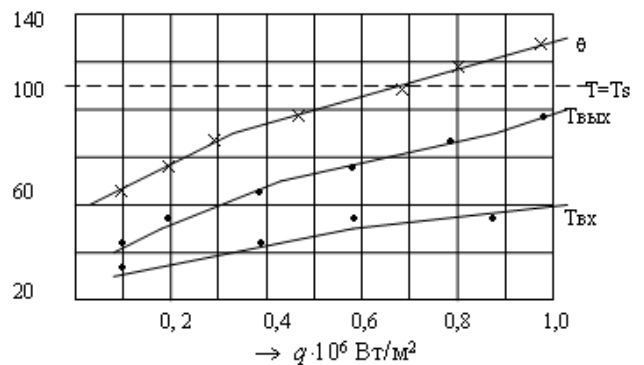
скими гидрофонами и датчиками нейтронного потока, расположенными по высоте канала  $l=0,5$ м вверх и вниз. Экспериментальные данные как результат исследований акустических измерений сводились к характеристикам, представленным на рис.3 [33].

$S_A \cdot 10^{-3}$



а

$T, \vartheta, [^{\circ}\text{C}]$



б)

**Рис. 3.** Экспериментальные данные, характеризующие температурный режим канала (б) и акустические спектральные характеристики (а).

Обозначения (а):  $\blacksquare$  –  $f=0...1$ кГц;  
 $\blacklozenge$  –  $f=1...2$ кГц;  $\blacktriangle$  –  $f=2...3$ кГц;  
 $\blacklozenge \times$  –  $f=3...4$ кГц;  $\odot$  –  $f=4...5$ кГц.

Из рассмотрения акустических спектров кипения (рис. 3(а)) были сделаны следующие выводы.

1. Частотные характеристики  $S_A=F(f, q)$ , представленные на рис.3(а), отражают зависимость энергии акустического шума в зависимости от подводимой удельной тепловой нагрузки  $q$  и частоты колебаний шума  $f$ .

2. Акустические спектры охватывают тем большую часть графика, чем выше тепловая нагрузка.

3. В области начала кипения отмечается снижение энергии спектра, обусловленной затуханием акустического сигнала. Область нача-

ла поверхностного кипения соответствует тепловой нагрузке  $q=(0,6\div0,8)\cdot10^6\text{Вт/м}^2$ .

Большое количество работ [34-39 и др.], опубликованных в настоящее время, свидетельствует об актуальности проблемы идентификации кризиса теплоотдачи 1-го рода на поверхности парогенерирующих каналов в реакторе ВВЭР.

### Заключение

Проведенный анализ аварийных процессов на АЭС позволил сделать вывод, что комплексное решение проблемы обеспечения безопасности ядерных энергетических установок (ЯЭУ) предполагает создание быстродействующих систем диагностики и управления всеми блоками ЯЭУ, включая ядерный реактор.

### Список литературы

1. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. – Одесса: Астропринт, 2001. – 307 с.
2. Емельянов И.Я., Гаврилов П.А., Селиверстов Б.Н. Управление и безопасность ядерных энергетических установок – М.: Атомиздат, 1975. – 280с.
3. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
4. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360с
5. Грибанов А.А., Линьков С.И. Особенности реализации канала контроля температуры СУЗ на контроллере М167-2 // Системы управления и обработки информации: Научн.-техн. сб., ФНПЦ НПО "Аврора", СПб. – 2003. – Вып. 5. – С.143-150.
6. Корчнов Ю.Н. и др. Универсальный модуль сопряжения датчиков внутриреакторных измерений с компьютером // Датчики и системы. – 2003. – №7. – С. 38-41.
7. Никулин Э.С., Пахоменков Ю.М. О построении многоканальных вторичных преобразователей сигналов термпар // Системы управления и обработки информации: Научн.-техн. сб., ФНПЦ НПО "Аврора", СПб. – 2004. – Вып. 8. – С.134-142.
8. Юферов А.Г., Ибрагимов Р.П. Реактиметр как адаптивный цифровой фильтр // Атомная энергия. 2005. – Т. 98. – Вып. 4. – С. 253-260.
9. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
10. Герлига В.А., Скалозуб В.И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 520с.
11. Петухов Б.С., Генин Л.Г., Ковалев С.А.. Теплообмен в ядерных энергетических установках – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 460с.
12. Долинский А.А., Шараевский И.Г., Фиалко Н.М. Методология распознавания и верификации кризисов теплоотдачи в стержневых сборках.// Промышленная теплотехника. – 2005. – Т.27. – №6. – С.66-80.
13. Шараевский И.Г., Фиалко Н.М., Меранова Н.О. Кризис теплоотдачи при кипении недогретой и насыщенной жидкости на поверхности твэл как диагностический объект // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. – 2009. – Вып.12. – С.80-85.
14. Бобков В.П., Смогалев И.П. О точности описания различными кодами критических тепловых потоков в пучках стержней // Теплоэнергетика. – 2001. – №3. – С.21-28.
15. Мигров Ю.А., Соловьев С.Л. Теплогидравлические расчетные коды нового поколения. Общая характеристика и перспективы развития //Теплофизические аспекты безопасности АЭС. Теплогидравлические коды для энергетических реакторов (разработка и верификация) /Сб. тез. док. Конф. «Теплофизика-2001», Обнинск, 2001.
16. Нигматулин Б.И., Мелихов О.И., Соловьев С.Л. Состояние и развитие отечественных системных теплогидравлических кодов для моделирования аварийных и нестационарных процессов на АЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – №3. – С.17-20.
17. Абагян А.А., Воронин Л.М., Филимонцев Ю.Н. Проблемные вопросы эксплуатации АЭС // Материалы 2-й международной конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, ВНИИАЭС. – 2001. – С.49-52.
18. Корниенко К.А., Аркадов Г.В., Финкель Б.М. и др. Создание и внедрение систем диагностики на АЭС с ВВЭР.// Материалы 2-й международной конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, ВНИИАЭС. – 2001. – С.166-169.
19. Морозов В.И. Приоритетные направления внедрения диагностического обеспечения на АЭС // Атомная энергия. – 2000. – Т.88. – №4. – С.311-313.
20. Калинушкин А.Е., Митин В.И., Семченков Ю.М. Создание экспертных систем для ядерной энергетики // Атомная техника за рубежом. – 1990. – №7. – С.3-12.
21. Шараевский И.Г., Домашнев Е.Д., Архипов А.П. Метод верификации начала вскипания теплоносителя в каналах ядерного реактора.// Пром. теплотехника. – 2001. – Т.23, №4-5. – С.114-121.
22. Шараевский И.Г., Е.Н. Письменный, Е.Д. Домашнев и др. Возможности совершенствования компьютерных систем контроля АЭС на основе

- методов искусственного интеллекта// Пром. теплотехника. – 2000. – Т.22, №1. – С.80-85.
  23. Шараевский И.Г. Распознавание режимов течения двухфазного потока в каналах ядерного реактора по шумам технологических параметров // Пром. теплотехника. – 2000. – Т.22, №1. – С.53-59.
  24. Fukutomi S. An integrated operator decision and system for boiling water reactor power plants/ S. Fukutomi, N. Naito, Y. Takizawa// Nucl. Technology. – 1992. – Vol.99, No.1. – P.120-131.
  25. Weiss S. Experience with operator aids for nuclear power plants in the USA/ S. Weiss, W. Reagan, I. Roe// Man-Machine Interface in Nuclear Industry. Tokyo, 15-19 Febr. 1988. Proc. Int. Conf. Vienna, 1988. – P.323-324.
  26. Сапожников Ю.А., Шевелев Д.В. Анализ неопределенности результатов тепло гидравлических анализов // Пром. теплотехника. – 2004. – Т.26, №6. – С.169-175.
  27. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Accident analysis of nuclear power plants, Main Report, Safety Series, IAEA, Vienna. — 2000.
  28. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of nuclear power plants: Design, Draft Requirements, Safety Standart Series, NS-R-1, IAEA, Vienna. – 2000.
  29. Scherer C.S. Multiobjective output feedback control via LMI optimization / C.S. Scherer, P. Gahinet, M. Chilali // Ibid. – 1997. – 42, N 7. – P.896-911
  30. RELAP5/MOD3.2. Code manual.NUREG/CR-5535. INEL-95/0174.Vol.1-7.
  31. Кириллов П.Х. Опыт эксплуатации реакторов указывает на необходимость новых теплогидравлических исследований // Атомная техника за рубежом. – 2003. – №9. – С.3-9.
  32. Попов И.А, Скидан А.А., Петров С.В. Идентификация кипения в экспериментальном канале ядерного реактора ИР-100 // Промышленная теплотехника. – 2007. – т. 29, №3. – С.67-75.
  33. Попов И. А, Качур С.А. Идентификация процесса поверхностного кипения теплоносителя в активной зоне АЭУ с ВВЭР // Севастополь: Сб.науч.тр. СНУЯЭиП. – 2009. – Вып.4(32). – С.68 -76.
  34. Архипов А.И., Авраменко А.А., Волошина И.В. и др. Исследование кризиса теплоотдачи при кипении в каналах пучка стержней // Пром. теплотехника. – 2009. – Т.31, №3. – С.62-66.
  35. Башкиров С.М., Большаков В.В., Кобзарь Л.Л. и др. Экспериментальное исследование гидравлического сопротивления и критических тепловых потоков в моделях ТВС реактора ВВЭР-Т//Материалы конф. «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск. – 2007.
  36. Башкиров С.М., Большаков В.В., Кобзарь Л.Л. и др. Экспериментальное исследование кризиса теплоотдачи в каналах с витыми тепловыделяющими стержнями // Теплоэнергетика. – 2007. – №5. – С.50-52.
  37. Захаров С.В., Павлов Ю.М. Методика расчета критической плотности теплового потока при пузырьковом кипении в каналах // Теплоэнергетика. – 2004. – №3. – С.72-77.
  38. Кириллов П.Л. Новое о методах интенсификации теплообмена поверхности с кипящей водой// Атомная техника за рубежом. – 2005. – №10. – С.3-7.
  39. Ковецкая М.М. Кризис теплообмена в пучках стержней с закруткой потока // Пром. теплотехника. – 2009. – Т.31, №5. – С.50-55.
- ## References
1. Demchenko V.A. *Avtomatizaciya i modelirovanie tehnologicheskikh proccessov AES i TES* [Automation and modeling of technological processes of nuclear power plants and thermal power plants], Odessa, Astroprint, 2001, 307 p.
  2. Emel'yanov I.Ya., Gavrilov P.A., Seliverstov B.N. *Upravlenie i bezopasnost' yadernyh energeticheskikh reaktorov* [Control and safety of nuclear power reactors]. Moscow, Atomizdat, 1975. 280p.
  3. Ostrejkovskij V.A. *Ekspluatatsiya atomnyh stancij* [Exploitation of the atomic stations] Moscow, Energoatomizdat, 1999, 928 p.
  4. Kirilov P.L., Yur'ev Yu.L., Bobkov V.P. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschyotam* [Reference book upon heat-hydraulic accounts]. Moscow, Energoizdat, 1990, 360p.
  5. Gribanov A.A., Lin'kov S.I. Features of the implementation of the CPS temperature control channel on the M167-2 controller. *Sistemy obrabotki i upravleniya informacii: Nauch.-tehn. Sb., FNPC "Avrora", SPb*, 2003, V. 5, pp.143-150.
  6. Korchnov Yu.N. Universal module for interfacing sensors of in-reactor measurements with a computer. *Datchiki i sistemy*. 2003, No. 7, pp. 38-41.
  7. Nikulin E.S., Pahomenko Yu.M. On the construction of multichannel secondary converters of thermocouple signals, *Sistemy obrabotki i upravleniya informacii: Nauch.-tehn. Sb., FNPC "Avrora"*, 2004,V. 8, pp.134-142.
  8. Yuferov A.G., Ibragimov P.L. Reactimeter as an adaptive digital filter, *Atomnaya energiya*, 2005, Vol. 9, V. 4, pp. 253-260.
  9. Emelyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantsnov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernimi reaktorami* [Scientific and technical control bases by nuclear reactors]. Moscow, Energoizdat, 1981, 360 p
  10. Gerliga V.A., Skalozub V.I. *Puzyr'kovye kipyaschie potoki v energooborudovanii AES* [Nucleate boiling flows in nuclear power plant power equipment]. Moscow, Energoizdat, 1992, 520p.
  11. Petuhov B.S., Genin L.G., Kovalyov S.A. *Teploobmen v yadernyh energeticheskikh ustanovkakh* [Heat exchange in nuclear power plants] Moscow, Energoatomizdat, 1986, 460 p.

12. Dolinskij A.A., Sharaevskij I.G., Fialko N.M. The methodology for the recognition and verification of the crisis of heat transfer in rod assemblies. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2005, Vol. 27, No 6, pp. 66-80.
13. Sharaevskij I.G., Fialko N.M., Meranova N.O. The crisis of heat transfer during boiling of an underheated and saturated liquid on the surface of a fuel element as a diagnostic object. *Problemy bezopasnosti atomnyh elektrostancij i Chernobylea*, 2009, Vol. 12, pp. 80-85.
14. Bobkov V.P., Smogalev I.P. On the accuracy of the description of critical heat fluxes in rod bundles by various codes. *Teploenergetika*, 2001, No. 3, pp. 21-28.
15. Migrov Yu.A., Solov'yov S.L. Thermohydraulic calculation codes of the new generation. General characteristics and development prospects, *Obninsk, Sb. tez. dok. Konferenciya "Teplofizika-2000"*, 2001.
16. Nigmatulin B.I., Melihov O.I., Solov'yov S.L. The state and development of domestic system thermohydraulic codes for modeling emergency and non-stationary processes at nuclear power plants. *Teploenergetika*, 2001, No. 3, pp. 17-20.
17. Abagyan A.A., Voronin L.M., Filimonov Yu.N. Problematic issues of NPP operation, Materials of the 2nd International Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy", Moscow, VNIIAES, 2001, pp. 49-52.
18. Konienko K.A., Arkadov K.A., Finkel' B.M. Creation and implementation of diagnostic systems at nuclear power plants with VVER, Materials of the 2nd International Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy", Moscow, VNIIAES, 2001, pp. 166-169.
19. Morozov V.I. Priority areas for the introduction of diagnostic support at nuclear power plants, *Atomnaya energiya*, 2000, V.88, No.4, pp. 311-313.
20. Kalinushkin A.E., Mitin V.I., Semchenkov Yu.M. Creation of expert systems for nuclear energy, *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 1990, No 7, pp. 3-12.
21. Sharoevskij I.G., Domashev E.D., Arhipova A.P. Method of verification of beginning of boiling up of coolant in the channels of nuclear reactor. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2001, Vol. 23, No 4-5, pp. 114-121.
22. Sharoevskij I.G., Pis'mennyy E.N., Domashev E.D. The possibilities of improving computer control systems of nuclear power plants based on artificial intelligence methods. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2000, Vol. 22, No 1, pp. 80-85.
23. Sharoevskij I.G. Recognition of the modes of flow of diphasic stream in the channels of nuclear reactor on noises of technological parameters. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2000, Vol. 22, No 1, pp. 53-59.
24. Fukutomi S. An integrated operator decision and system for boiling water reactor power plants/ S. Fukutomi, N. Naito, Y. Takizawa, Nucl. Technology, 1992, Vol.99, No.1, pp.120-131.
25. Weiss S. Experience with operator aids for nuclear power plants in the USA/ S. Weiss, W. Reagan, I. Roe// Man-Machine Interface in Nuclear Industry. Tokyo, 15-19 Febr. 1988. Proc. Int. Conf. Vienna, 1988, pp.323-324.
26. Sapozhnikov Yu.A., Shevelev D.V. Analysis of the uncertainty of the results of heat and hydraulic analyses. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2004, Vol. 26, No 6, pp. 169-175.
27. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Accident analysis of nuclear power plants, Main Report, Safety Series, IAEA, Vienna, 2000.
28. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Safety of nuclear power plants: Design, Draft Requirements, Safety Standard Series, NS-R-1, IAEA, Vienna, 2000.
29. Scherer C.S. Multiobjective output feedback control via LMI optimization / C.S. Scherer, P. Gahinet, M. Chilali // Ibid, 1997, 42, N 7, pp.896-911
30. RELAP5/MOD3.2. Code manual. NUREG/CR-5535. INEL-95/0174. Vol.1-7.
31. Kirilov P.H. The experience of operating reactors indicates the need for new thermal and hydraulic studies. *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 2003, No. 9, pp. 3-9.
32. Popov I.A., Skidan A.A., Petrov S.V. Identification of boiling in the experimental channel of the IR-100 nuclear reactor. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2007, Vol. 29, No 3, pp. 67-75.
33. Popov I.A., Kachur S.A. Identification of process of the superficial boiling of coolant in the active zone APP with PWR. *Sevastopol: Sb. nauch. tr. SNUYaEiP*, 2009, No 4(32), pp. 68-76.
34. Arhipov A.I., Avramenko A.A., Voloshin I.V. Investigation of the heat transfer crisis during boiling in the channels of a beam of rods. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2009, Vol. 31, No 3, pp. 62-66.
35. Bashkirov S.M., Bol'shakov V.V., Kobzar' L.L. Experimental study of hydraulic resistance and critical heat flows in models of fuel assemblies of the VVER-T reactor, Materials of the conference "Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER", Podjl'sk, 2007.
36. Bashkirov S.M., Bol'shakov V.V., Kobzar' L.L. Experimental study of the heat transfer crisis in channels with twisted heat-generating rods. *Teploenergetika*, 2007, No. 5, pp. 50-52.
37. Zaharov S.V., Pavlov Yu.M. Method for calculating the critical heat flux density at bubble boiling in channels. *Teploenergetika*, 2004, No. 3, pp.72-77.
38. Kirilov P.L. New methods of intensification of surface heat exchange with boiling water. *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 2005, No 10, pp. 3-7.
39. Kovehkaya M.M. Crisis of heat exchange in the bunches of bars with twirling of stream. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2009, Vol. 31, NO 5, pp. 50-55.

УДК 621.039.56

## Модель функционирования бортовых систем космического аппарата в комплексе с реакторной установкой на основе сетей Петри

С.А. Качур, Е.Н. Давиденко

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur\_62@mail.ru

Статья поступила 24.06.2021 г.; после доработки 25.06.2021 г.

### Аннотация

Предложена быстродействующая компактная модель функционирования космического аппарата с реакторной установкой с использованием циклограмм работы бортовых систем на основе сетей Петри.

**Ключевые слова:** космический аппарат, реакторная установка, сети Петри, модель, циклограмма.

## Model of the functioning of the onboard systems of the spacecraft in combination with a reactor installation based on Petri nets

S.A. Kachur, E.N. Davidenko

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur\_62@mail.ru

Received 24.06.2021 y.; received in final form 25.06.2021 y.

### Abstract

A high-speed compact model of the functioning of a spacecraft with a reactor installation using cyclograms of the operation of onboard systems based on Petri nets is proposed.

**Keywords:** spacecraft, reactor plant, Petri nets, model, cyclogram.

### Введение

В статьях, посвященных управлению космическими или летательными аппаратами, обычно в качестве модели ОУ принимается математическая модель движения аппарата без учета особенностей функционирования РУ [1, 2]. Ведутся разработки алгоритмов оптимального управления, позволяющих эффективно решать задачи управления движением, прогнозирования траектории движения космического аппарата (КА), рассматриваются различные подходы к управлению полетом КА [3].

Однако управление полетом КА требует целостного рассмотрения функционирования всего комплекса бортовых систем и представляет собой управление параметрами его состояния с учетом

РУ [4]. Одной из проблем управления современными КА и КА будущего является повышение автономности их полета. В этом случае управление параметрами состояния КА выполняет бортовой комплекс автоматического управления. Целенаправленное изменение некоторых параметров состояния КА возможно только выполнением достаточно сложных операций.

Изменение состояния КА описывается обычно на двух уровнях в виде:

- 1) циклограмм изменения режимов функционирования бортовых систем при выполнении операций;
- 2) циклограмм изменения работы отдельных блоков. Управляющее воздействие в случае автономного полета представляет собой команды, выдаваемые комплексом средств ав-

томатического управления, и команды от других бортовых систем.

Основные методы решения задачи оптимального управления могут быть с успехом использованы для систем со случайными изменениями структуры. Однако если процесс смены структур является немарковским и множество структур недетерминировано, и система функционирует в условиях неопределенности, то необходимо, приняв рассмотренные методы за базис, модифицировать их с учетом модели процесса. Кроме того, рассмотренные методы целесообразно рассматривать совместно с моделями СП. В статье показана необходимость такого синтеза на примере упрощенного описания функционирования космического аппарата (КА), одним из блоков которого является реакторная установка.

### **Цель и задачи исследования**

Целью исследования является создания быстродействующей компактной модели функционирования космического аппарата с реакторной установкой с использованием циклограмм работы бортовых систем на основе сетей Петри.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) анализ возможностей алгоритмов адаптивного управления динамическими объектами в условиях неопределенности;
- 2) определение особенностей построения систем управления реакторной установкой;
- 3) разработка принципов построения модели функционирования бортовых систем космического аппарата в комплексе с реакторной установкой на основе сетей Петри.

### **Адаптивное управление динамическими объектами в условиях неопределенности**

Проблеме управления объектами математические, модели которых известны с точностью до параметров, когда для этих параметров предполагаются заданными лишь какие-то их достаточно грубые априорные оценки, посвящено большое количество публикаций. Но в этих публикациях рассматривались лишь модели объектов, линейных по параметрам. Причины такой избирательности, по-видимому, лежат не только в том, что этот класс объектов встречается чаще, но и в том, что для таких объектов задачи построения гарантированных оценок, основанные на использовании процедур пересечения мно-

жеств, решаются существенно проще, чем для класса объектов, нелинейных по параметрам.

Главное отличие адаптивного управления состоит в том, что параллельно с процессом управления реализуется процесс оценивания параметров объекта, причем полученные оценки непосредственно используются для определения управления. Конечный момент метода синтеза адаптивного управления, который базируется на множественном подходе, — предположение о том, что для вектора параметров объекта управления, вектора состояния системы, векторов неконтролируемых возмущений и погрешностей измерений известны некоторые априорные оценки в виде заданных множеств в соответствующих пространствах. Эта априорная информация используется в процедурах множественной фильтрации и множественной идентификации. Получаемые в дальнейшем множественные апостериорные оценки также используются при расчете по следующим управляющим воздействиям. Важнейшие ранние результаты в этой области обобщены в [5].

Большинство существующих методов синтеза управления в системах, математическая модель которых неизвестна, разделяется на два этапа. Сначала на объекте управления проводятся эксперименты, по результатам которых идентифицируется модель системы, а затем на основе полученной модели проектируется управление. Если по ряду причин построить точную модель не представляется возможным и сохраняется немоделируемая часть динамики системы, т.е. неопределенность, то построенное таким образом управление может оказаться неэффективным из-за ошибок моделирования. Поэтому в последние годы развиваются альтернативные подходы, в которых комплексно и взаимосогласованно рассматриваются все этапы проектирования, включая идентификацию или уточнение модели, синтез обратной связи и оценивание состояния, если используется описание в пространстве состояний

Предлагается для разработки описания систем управления (нелинейных с недетерминированным поведением) в условиях неопределенности использовать методы построения моделей стохастических систем со случайной структурой и модели иерархических адаптивных субоптимальных САУ.

Обеспечение безопасности эксплуатации РУ предполагает в качестве основного направления исследования объекта, описанного предложенной моделью, рассмотрение его управляемости. Во многих практических задачах аналитические

и структурные подходы анализа управляемости оказываются неприемлемыми по причине чрезмерной громоздкости или недостаточной разработки. В этих случаях прибегают к численному эмпирическому изучению управляемости путем моделирования. Сложность объектов управления породила необходимость в разработке новых методов, подходов и моделей управления. Поэтому разработки методов анализа управляемости таких систем актуальны.

Структура адаптивных оптимальных САУ (АОСАУ) в значительной степени определяется принципами разделения. Согласно этим принципам оптимальная (в линейно-квадратичной задаче) или субоптимальная (в нелинейной задаче) система состоит из оптимальной (субоптимальной) системы оценивания и идентификации и системы оптимального управления, построенной для условий точного измерения вектора состояния и вектора параметров, но использующей оценки этих величин (выходные сигналы системы оценивания и идентификации).

В неоптимальных вариантах (когда идентификатор соединяется с системами регулирования традиционных типов) соответствующие структуры имеют эвристическое происхождение. Однако структура АОСАУ, как следует из принципа разделения, имеет достаточно общее и строгое обоснование. Эта процедура в общем виде представлена на рис. 1.



Рис.1. Общая структура АОСАУ с полной моделью.

Создание АО САУ на базе СП позволяет синтезировать достоинства двух рассмотренных выше типов САУ, и, следовательно, даст возможность повысить эффективность управления РУ.

### Особенности построения систем управления реакторной установкой

Решение проблемы безопасности эксплуатации РУ и объектов, использующих в качестве энергоблоков РУ, неразрывно связано с рассмотрением задач контроля параметров, их оптимизации, выбора оптимальной структуры системы в процессе функционирования. Формализация методов и алгоритмов оптимизации является базой для разработки соответствующих нормативных документов, регламентирующих процесс эксплуатации РУ, и систем контроля и управления.

В соответствии с определением, динамическая система случай структуры в каждый момент времени  $t$  может иметь одну из  $s$  детерминированных структур. Обычно рассматривается случай, когда номер структуры определяется случайным марковским процессом, характеристики которого зависят от внешних условий, от значений фазовых координат системы или от ее надежности в помехозащищенности. Наличие мультиструктуры со случайными переходами вносит особенность в задачу оптимизации таких систем. Эта особенность состоит в том, что в процессе оптимизации необходимо оценивать структуру, в которой находится система. Основной задачей оптимизации является определение оптимальных условий или оператора управления в присутствии помех при заданной информации об объекте управления в виде уравнений, характеризующих его состояние и эволюцию с учетом измерений фазовых координат.

Выбор критерия оптимальности должен производиться, исходя из смысла решаемой задачи. При этом следует иметь в виду, что от вида критерия, используемого объема априорной информации, а также возможностей простой реализации зависит практическая эффективность алгоритмов оптимального управления.

При применении терминальных и нетерминальных критериев для определения оптимального управления без учета ограничений на управление применяются классические вариационные методы, а с учетом ограничений — принцип максимума, динамическое программирование.

Основные методы решения задачи оптимального управления могут быть с успехом ис-

пользованы для систем со случайными изменениями структуры. Однако если процесс смены структур является немарковским и множество структур недетерминировано, и система функционирует в условиях неопределенности, то необходимо, приняв рассмотренные методы за базис, модифицировать их с учетом модели процесса.

Задачи синтеза оптимального управления в мультиструктурных системах составляют основную проблематику статистической теории оптимальных решений. Для исследования широко применяется математическое описание процессов и динамических систем в фазовом пространстве состояний и теоретико-вероятностные методы оптимальных статистических решений. Однако наличие случайной структуры сигналов и систем приводит к усложнению задач управления и требует дополнительного развития методов исследования. Поскольку для повышения быстродействия процесса управления РУ в работе предложено использовать описание стохастических систем и их соединений на основе расширения СП, то существующие методы оптимального управления рассмотрены совместно с моделями СП. Такой подход к оптимизации параметров и структуры объекта в отличие от существующих (аналитических, теоретико-вероятностных, статистических и др.) можно назвать сетевым, поскольку управляющие воздействия определяются в процессе моделирования сети Петри.

Кроме того, специфика управления РУ связана с назначением объекта управления. РУ являются не только энергоблоками АЭС, но и используются в качестве двигателей космических аппаратов, морских подводных и надводных судов. Основные проблемы безопасности транспортных РУ совпадают с проблемами эксплуатации энергоблоков АЭС. Однако для транспортных РУ необходимо рассмотрение их функционирования в комплексе с основными блоками объекта управления. На примере космического аппарата (КА), одним из блоков которого является реакторная установка, покажем разработку упрощенного описания такого объекта управления.

### **Принципы построения модели функционирования бортовых систем космического аппарата в комплексе с реакторной установкой на основе сетей Петри**

Предложенное в работе [6] расширение сетей Петри (СП) может служить инструментарием для описания работы КА с РУ, как на струк-

турном, так и функциональном уровне. Применение такой сетевой модели позволяет:

- 1) снизить объем описания (следовательно, его сложность) КА;
- 2) рассматривать асинхронные процессы функционирования различных бортовых систем КА;
- 3) учитывать причинно-следственные зависимости: а) структурно – между бортовыми системами, б) функционально – при выполнении команд;
- 4) естественным образом моделировать параллельность работы бортовых систем КА;
- 5) рассматривать КА в целом, не выделяя отдельные бортовые системы при наличии потока событий (изменения внешних воздействий и/или приходе множества команд).

Сетевая модель КА с РУ — это синтез на базе СП циклограмм изменения состояния КА, описания структуры бортового комплекса и набора команд КА, позволяющий организовать оперативное реагирование на внешние воздействия за счет снижения сложности описания и его самообучаемости (т.е. изменения вероятностей связей между бортовыми системами и формирования сдерживающих событийных гипердуг) без нарушения целостности функционирования КА.

Такая модель может служить основой адаптивной САУ на базе СП, в качестве объекта управления которой выступают бортовые системы КА.

Моделирующие возможности предлагаемой модели определяются возможностями математического аппарата СП, в частности его расширения [6]. В основу данного расширения СП положены стохастические и функциональные СП. Это позволяет описывать стохастические процессы, определять условия их преобразования, организовывать память и задавать любые функции, сопоставляя их переходам СП.

При разработке модели будем использовать следующие представления:

- 1) команда ( $K_i$ ) — совокупность операций, описываемая СП (операция сопоставлена переходу СП), предназначенная для установки параметра  $x_i$  в значение  $a_i$ ;
- 2) операция ( $OP_j$ ) — последовательность действий (в виде функций, систем уравнений, программ), в результате которых определяется вектор управляющих сигналов, подаваемый на бортовые системы;
- 3) бортовая система ( $BC_k$ ) — стохастическая система, описываемая системой дифференциальных уравнений первого порядка; в результате ее работы могут вырабатываться сигналами

лы, определяющие код команды, которая либо непосредственно передается на другие бортовые системы, либо передается на бортовой комплекс автоматизированного управления.

Сетевая модель КА с РУ состоит из двух взаимосвязанных частей: функциональной и структурной. Функциональная часть модели содержит описание всего множества команд в виде единой, безизбыточной относительно операций СП. Сдерживающие событийные гипердуги отражают совместимость операций. Структурная модель включает СП, переходам которой сопо-

ставлены бортовые системы, а дугам — связи между этими системами. Обобщенная схема модели приведена на рис. 2(а), а вид СП ее структурной и функциональной частей соответственно на рис. 2(б) и 2(в). Помимо условий, связанных с логикой функционирования систем, переходам первой части модели сопоставлено условие подключения БС при определенных операциях, а переходам второй части модели — условие выполнения операции при определенных командах.

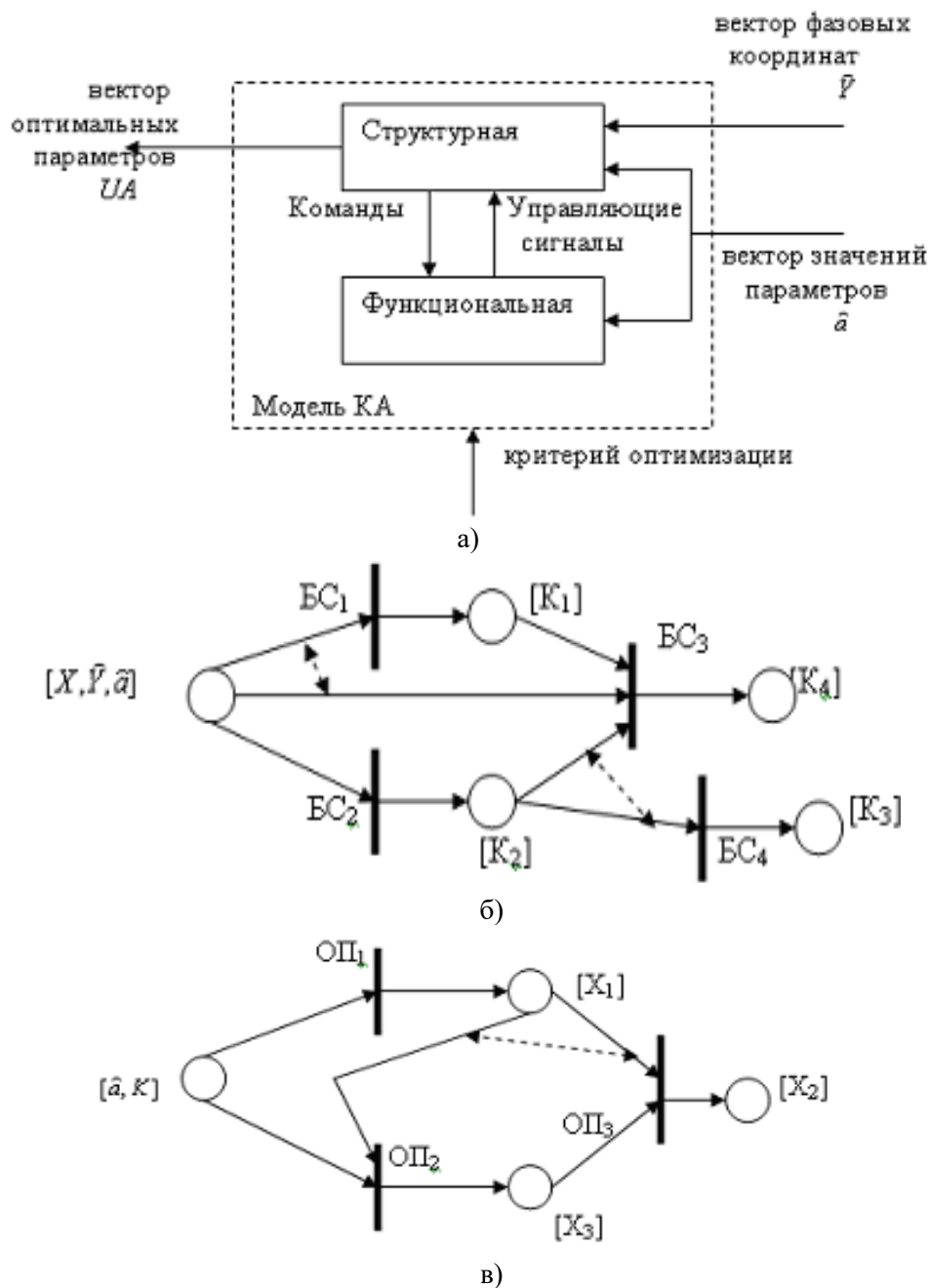


Рис. 2. Схема сетевой модели КА с РУ

Для наглядности представления связи между двумя частями модели КА управляющие сигналы  $(\hat{a}, \hat{Y}, X = \bigcup_i x_i, K = \bigcup_i K_i)$  подаются на один переход и алгоритмы их формирования не детализируются. Кроме того, дугам сопоставлены вероятности передачи сигналов.

Для определения вектора  $UA$  оптимальных параметров без управления структурой КА, необходимо разработать алгоритм оптимизации параметров, ориентированный на специфику описания объекта сетями Петри. Моделирование СП первой и второй части модели не имеет принципиальных различий. Отличие заключается в действиях, сопоставленных переходам.

Сложность предлагаемой модели КА значительно ниже сложности описания КА в виде циклограмм изменения работы двух уровней. Причем, снижение сложности модели не приводит к снижению точности отображения реальных процессов.

### Заключение

Рассмотрено возможное решение проблемы безопасности эксплуатации РУ и объектов, использующих в качестве энергоблоков РУ, неразрывно связано с рассмотрением задач контроля параметров, их оптимизации, выбора оптимальной структуры системы в процессе функционирования.

Предложены научно-технические основы создания систем управления, применимые к различным типам высокотехнологичных объектов, в структуру которых входят РУ. В качестве примера дано описание работы высокотехнологичного объекта КА как на структурном, так и на функциональном уровне в терминах СП

### Список литературы

1. Левский М.В. Оптимальное управление пространственным разворотом космического аппарата // Космические исследования. – 1995. – 33, №5. – С.498 -502.
2. Морозов Л.В. Нелинейное адаптивное терминальное управление наведением малоразмерного планирующего космического аппарата // Космические исследования. – 1996. – 34, №2. – С.197-206.
3. Туник А.А., Абрамович Е.А. Многомодельный подход к параметрической робастной оптимизации цифровых систем управления полетом // Проблемы управления и информатики. – 2004. – № 2. – С.32-43.
4. Кравец В.Г., Любинский В.Е. Основы управления космическими полетами – М.: Машино-

строение, 1983. – 224с.

5. Красовский А.А. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными процессами – М.: Наука, 1977. — 271с.
6. Качур С.А. Модель стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №1. – С.93-98.

### References

1. Levskij M.V. Optimal control of the spatial rotation of the spacecraft. *Kosmicheskie issledovaniya*, 1995, v. 33, No.5, pp.498 -502.
2. Morozov L.V. Nonlinear adaptive terminal guidance control of a small-sized gliding spacecraft *Kosmicheskie issledovaniya*, 1996, v. 34, No.2, pp. 197-206.
3. Tunik A.A., Abramovich E.A. A multi-model approach to parametric robust optimization of digital flight control systems *Problemy upravleniya i informatiki*, 2004, No. 2, pp. 32-43.
4. Kravec V.G., Lyubinskij V.E. *Osnovy upravleniya kosmicheskimi polyotami* [Fundamentals of space flight management]. Moscow, Mashinostroenie, 1983, 224p.
5. Krasovskij A.A. *Universal'nye algoritmy optimal'nogo upravleniya nepreryvnymi processami* [Universal algorithms for optimal control of continuous processes] Moscow, Nauka, 1977, 271p.
6. Kachur S.A. Model of the stochastic systems and their combination on the basis of the Petry nets. *Problemy upravleniya i informatiki*, 2002, No.1, pp. 93-98.

УДК. 621.646.958

## Анализ и диагностика утечек газов на АЭС

Н.И. Кузнецова<sup>1</sup>, Д.В.Карнаушенко<sup>2</sup>, М.М.Дельцов<sup>3</sup>*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>nika100452@gmail.com, <sup>2</sup>daniilkerch17@gmail.com, <sup>3</sup>scout3004@gmail.com*

Статья поступила 28.06.2021 г.; после доработки 30.06.2021 г.

### Аннотация

*Статья посвящена вопросам технологической безопасности обеспечения нормальной эксплуатации на АЭС. Освещены вопросы очистки газообразных радиоактивных отходов. Рассмотрены системы реакторного отделения, в частности система газовых сдувок, система газоочистки, система дожигания водорода, система контроля концентрации водорода. Представлены методы дистанционной визуализации утечек и точного обнаружения утечек путем ультразвуковой дефектоскопии и инфракрасного диагностирования.*

*Ключевые слова:* утечка газа, безопасность, газоочистка, водород, диагностика.

## Analysis and diagnostics of gas leaks at nuclear power plants

N.I. Kuznetsova<sup>1</sup>, D.V.Karnaushenko<sup>2</sup>, M.M.Del'tsov<sup>3</sup>*Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
<sup>1</sup>nika100452@gmail.com, <sup>2</sup>daniilkerch17@gmail.com, <sup>3</sup>scout3004@gmail.com*

Received 28.06.2021 y.; received in final form 30.06.2021 y.

### Abstract

*The article is devoted to the issues of technological safety for ensuring normal operation at nuclear power plants. The issues of purification of gaseous radioactive waste are highlighted. The reactor compartment systems are considered, in particular, the gas blow-off system, the gas cleaning system, the hydrogen combustion system, and the hydrogen concentration control system. Methods of remote leak visualization and accurate leak detection by ultrasonic flaw detection and infrared diagnostics are presented.*

*Keywords:* gas leak, safety, gas cleaning, hydrogen, diagnostics.

### Введение

Для обеспечения нормальной эксплуатации и предотвращения аварийной ситуации на АЭС применяются системы безопасности, обеспечивающие режимы нормальной эксплуатации и системы непрерывного контроля за утечкой газов, а также очисткой газов. Система технологической безопасности для предотвращения утечки газов предполагает регулярные осмотры, планово-предупредительные работы, своевременное обслуживание, эксплуатацию оборудования и систем трубопроводов в соответствии с

инструкциями, нормативными документами отрасли.

Решение проблемы с обеспечением безопасной эксплуатации энергоблоков АЭС, является важнейшей и актуальной задачей.

Все радиоактивные отходы (РАО) подвергаются на АЭС очистке или дополнительной обработке на специальных установках. При этом одной из главных задач является значительное уменьшение объемов радиоактивных отходов, очистка газов [1, 2].

Целью данной статьи, на основе информации о системах безопасности, эксплуатируемых

на энергоблоках АЭС, является анализ существующих систем контроля очистки и утечки газов.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Произвести сбор и изучить информацию об используемых системах безопасности АЭС.
- Необходимо осветить, основные используемые методы контроля и произвести их сравнительный анализ
- Обобщить результаты полученного сравнительного анализа, оценить их эффективность при эксплуатации энергоблока.

### Обработка газообразных радиоактивных отходов

При делении ядер урана и плутония часть осколков деления образуется в газовой фазе. Это в основном инертные радиоактивные газы [3,4]. Газообразные продукты деления частично выходят из топливной композиции в газовый зазор между топливом и оболочкой твэла. В случае повреждения оболочки газообразные продукты деления поступают в теплоноситель. Очевидно, что это же относится и к продуктам деления следов топлива, находящихся на поверхности оболочек твэлов в результате их технологического загрязнения. Поэтому наличие неорганизованных утечек теплоносителя первого контура, активных сред обработки борсодержащих вод, переработки и хранения трапных вод, системы хранения сорбентов обуславливает поступление в воздух необслуживаемых помещений энергоблока радиоактивных газов и аэрозолей. Кроме того, газы и аэрозоли выделяются при ремонтных работах. В воздух также поступают водяные пары при вскрытии реактора и пары из бассейна выдержки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).

Аэрозоли образуются в основном при откачке газов из емкостей с жидкими активными средами: из фильтров очистки теплоносителя, компенсатора давления и его барботера, деаэратора и баков грязного конденсата. Активность аэрозолей определяется активностью мелкодисперсных жидких и твердых включений в газовом потоке.

Наиболее значимым в отношении активности газовых сбросов является ряд радионуклидов йода, ксенона, криптона, цезия, стронция, аргона. Относительно долгоживущие нуклиды, следующие:

- $^{131}\text{I}$  с периодом полураспада  $T_{1/2} = 8,1$  сут;

- $^{133}\text{Xe}$  с  $T_{1/2} = 5,3$  сут;
- $^{85}\text{Kr}$  с  $T_{1/2} = 10,8$  года.

Периоды полураспадов других нуклидов этих элементов исчисляются секундами, минутами или часами, в частности для  $^{135}\text{Xe}$   $T_{1/2} = 15,6$  мин, для  $^{132}\text{I}$   $T_{1/2} = 2,26$  ч, для  $^{139}\text{Xe}$   $T_{1/2} = 43$  с. Важной задачей является удаление из газового потока изотопа  $^{129}\text{I}$   $T_{1/2}$ , период полураспада которого составляет  $1,6 \cdot 10^7$  лет. Носителем активности также является тритий – тяжелый изотоп водорода с  $T_{1/2} = 12,26$  года. Тритий образуется в основном в реакции  $^{10}\text{B} (n, \alpha) \text{T}$  как результат поглощения нейтронов ядрами бора, присутствующими в теплоносителе. Наличие трития в газовом сбросе АЭС не определяет радиационную опасность сброса, поэтому не требуется специальной технологии его очистки от трития [4].

В основном, газообразные РАО состоят из аэрозолей, инертных газов (ксенона, криптона, аргона) и газообразного йода. Удаление газов из газовых объемов оборудования энергоблока выполняется системой газовых сдувок. Для этой цели используется азот. Газовые сдувки из баков борного раствора (энергоблока с реактором ВВЭР-1000), деаэратора подпитки-продувки, бака организованных протечек, системы дожига водорода, спецгазоочистки осуществляются при всех рабочих режимах, а также при останове энергоблока. Из корпуса реактора, коллекторов парогенераторов, компенсатора давления, гидроемкостей системы аварийного охлаждения активной зоны газовые сдувки проводятся перед пуском блока, при его заполнении водой и при перегрузке – перед снятием крышки реактора.

Очистка газового потока от аэрозолей выполняется в аэрозольных фильтрах, заполненных стекловолокном и обеспечивающих коэффициент очистки потока от аэрозолей:

$$K_{оч} = D_{исх} / D_{вых} \approx 1000$$

где  $D_{исх}$ ,  $D_{вых}$  – количества аэрозолей перед фильтром и после него.

Очистка от радиоизотопов йода осуществляется с помощью угольных фильтров. Фильтры заполнены активированным углем, и механизмом очистки газового потока от радиоизотопов йода является адсорбция. Интенсивность адсорбции зависит от температуры и влажности газового сброса и характеризуется коэффициентом адсорбции. Йод химически активен и образует химические соединения, для которых ко-

эффект адсорбции заметно ниже, чем для молекулярного йода, что ухудшает работу фильтров. Для сорбирования этих химических соединений в фильтрах применяют угольные сорбенты, обогащенные йодидами металлов, азотно-кислым серебром или триэтилендиамин. Очистка газовых потоков от инертных радиоактивных газов (ИРГ) также основана на явлении физической адсорбции радионуклидов в слое сорбента, заполняющего фильтр.

### Система газовых сдувок реакторного отделения

В качестве примера рассмотрена система газовых сдувок энергоблока с реактором ВВЭР-1000 [4]. Система предназначена:

- для уменьшения объемной концентрации сдувок водорода, выделяющегося из теплоносителя при снижении давления в первом контуре;
- разбавления азотом водорода, выделяющегося в баках борного раствора, барботажном баке, деаэраторе подпитки, охладителе и баке организованных протечек;
- создания при пуске энергоблока рабочего давления («азотной подушки») в гидроемкости системы аварийного расхолаживания и в компенсаторе давления;
- организации сдувок газов из теплообменника бассейна выдержки; заполнения азотом каналов ионизационных камер.

Система газовых сдувок работает при режимах нормальной эксплуатации, в том числе при пуске и останове, режимах нарушения нормальной эксплуатации, обесточивании энергоблока и аварийных режимах.

При режиме нормальной эксплуатации азот с давлением 0,05 МПа подается в барботажный бак и в охладитель организованных протечек. Прямоки организованных протечек продувается последовательно с охладителем. Из барботажного бака и прямки организованных протечек газовые сдувки направляются в систему газоочистки (СГО).

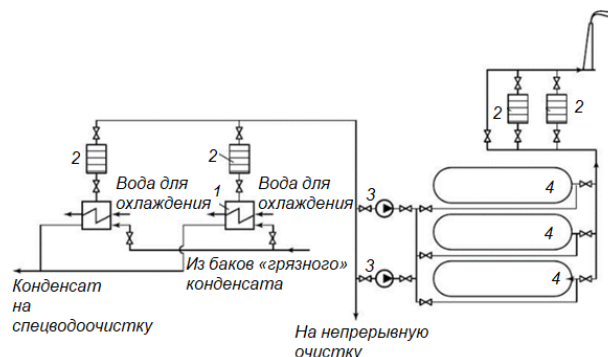
При дегазации систем выполняется подача азота низкого давления (0,05 МПа) для разбавления водорода, выделяющегося в коллекторах парогенераторов и корпусе реактора. Газовые сдувки через теплообменник и прямку организованных протечек направляются в СГО.

Основной причиной повышения активности в системе очистки технологических сдувок в режиме нормальной эксплуатации энергоблока является поступление сдувки из доохладите-

ля выпара деаэратора подпитки, в который полностью выводятся радиоактивные благородные газы (РБГ) из теплоносителя первого контура.

Расход газовых сдувок (в расчете на один энергоблок) равен около 10 м<sup>3</sup>/ч. Время задержки РБГ в фильтре-адсорбере составляет: для криптонов – 51ч; для ксенонов – 773 ч (обычно это время принимается по продолжительности выдержки ксенонов). Выдержка РБГ может выполняться в газгольдерах, схема газгольдерной установки представлена на рис. 1. Газ в газгольдеры подается компрессором 3 под давлением 0,6–1,0 МПа. Предварительно газы охлаждаются в газоохладителях 1 в целях конденсации влаги, затем они проходят через аэрозольные фильтры 2 и подаются в газгольдеры 4, откуда после выдержки и прохождения еще одной ступени аэрозольных фильтров 2 сбрасываются в вентиляционную трубу.

Повышенный газовый сброс обычно характерен для реактора, остановленного на перезагрузку, и выполняется ориентировочно в течение 8 ч. Схема газгольдерной очистки используется не только при перезагрузках реактора, но и при его нормальной эксплуатации, когда непрерывная очистка газа проводится в адсорберах.



**Рис. 1.** Схема газгольдерной установки:  
1 – газоохладитель; 2 – аэрозольные фильтры; 3 – компрессоры; 4 – газгольдеры.

### Система газоочистки

На АЭС применяется радиохромографическая очистка газов от радионуклидов, при которой радионуклиды накапливаются в слоях сорбента, одновременно подвергаясь радиоактивному распаду.

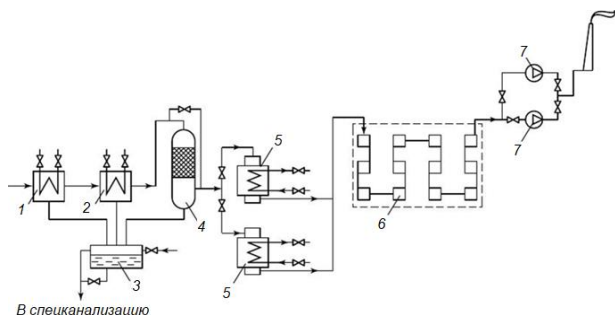
Система газоочистки энергоблока с реактором ВВЭР-1000 состоит из трех идентичных взаимозаменяемых подсистем, каждая из которых способна очистить от радионуклидов полный объем газового сброса энергоблока. Первая

подсистема является рабочей, вторая – вспомогательной, третья – резервной нитями. Предназначена СГО для очистки газовых сдувок после дожигания водорода.

В процессе эксплуатации энергоблока производятся постоянные сдувки радиоактивных газов из барботажного бака компенсатора объема, охладителя выпара деаэратора, системы подпитки первого контура, охладителя и прямка организованных протечек, а также из баков «грязного» конденсата. Во избежание образования взрывоопасных концентраций водорода газовые сдувки разбавляют азотом, а сдувки после деаэратора и барботера направляются в установку дожигания водорода.

Далее газовая смесь поступает на установку очистки газовых сдувок. Схема подсистемы представлена на рис. 2.

В основную рабочую подсистему газ поступает из системы дожигания водорода, во вспомогательную – из прямка организованных протечек и баков «грязного» конденсата. Каждая подсистема включает в себя три теплообменника, аэрозольный стекловолокнистый фильтр, бак-гидрозатвор, два цеолитовых фильтра, фильтр-адсорбер, две газодувки и два электрокалорифера.



**Рис. 2.** Подсистема газоочистки:

1 – теплообменник, охлаждаемый технической водой; 2 – теплообменник, охлаждаемый водой от холодильной машины; 3 – бак-гидрозатвор; 4 – аэрозольный фильтр; 5 – цеолитовые фильтры; 6 – фильтр-адсорбер; 7 – газодувки

Система газоочистки работает в режимах нормальной эксплуатации энергоблока, вывода бора, разогрева и расхолаживания энергоблока, а также обесточивания (с питанием от дизель-генераторов). Газ из системы дожигания водорода под напором, создаваемым газодувками, поступает в теплообменник 1, охлаждаемый технической водой, где его температура снижается до 20–40 °С. Далее он проходит через теплообменник 2, охлаждаемый водой от холо-

дильной машины. Сконденсированная в газовом потоке влага отводится в бак-гидрозатвор 3 и далее в спецканализацию. Затем газ поступает в аэрозольный фильтр 4, где очищается от жидких и твердых аэрозолей, после чего подвергается глубокой осушке в одном из цеолитовых фильтров 5. Сухой газ направляется в фильтр-адсорбер 6, где происходит его очистка от радиоактивных загрязнений. Фильтр-адсорбер представляет собой колонну, заполненную активированным углем. Проходя через фильтр-адсорбер, поток газа эффективно очищается как от нуклидов Кг и Хе, так и от I. Очищенный поток газа сбрасывается с помощью газодувки 7 в вентиляционную трубу.

Принцип работы вспомогательной рабочей нитки такой же, как и основной. В составе каждой нитки предусмотрено два цеолитовых фильтра 5. Когда один фильтр находится в работе, другой является резервным.

Сорбция влаги цеолитом происходит с выделением теплоты. При сорбции 1 кг влаги выделяется около 4200 кДж теплоты. Поэтому предусмотрено охлаждение цеолитовых фильтров. Все оборудование и арматура СГО выполняются сейсмостойкими.

Критерием нормальной работы системы газоочистки является снижение концентрации ИРГ в газовой сдувке на 2–2,5 порядка. При работе блока под нагрузкой допускается вывод в ремонт одной подсистемы СГО на срок до 8 ч. В случае, если работоспособность этой подсистемы не восстановлена в течение указанного времени или неработоспособны два канала СГО, блок должен быть остановлен и переведен в «холодное» состояние.

## Система дожигания водорода

Система дожигания водорода предназначена для обеспечения водородной взрывозащиты в объеме герметичного ограждения АЭС с реакторами типа ВВЭР при проектных и запроектных авариях.

Система является пассивной (не требует подвода электрической энергии) и ее основными элементами являются пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ).

Рекомбинаторы водорода ПКРВ предназначены для беспламенного дожигания (рекомбинации) водорода с целью предотвращения образования опасных скоплений водорода в герметичных помещениях. ПКРВ получили широкое применение на отечественных и зарубежных атомных электрических станциях.

Рекомбинатор ПКРВ включает в себя:

- цилиндрические катализаторы, объединенные в каталитические рамки;
- блок катализатора, состоящий из комплекта каталитических рамок;
- корпус (конвективный участок с защитным кожухом);
- петли крепления.

Представлен следующий модельный ряд: РВК-500, РВК-1000, РВК-2, РВК-3, РВК-4.

Работа рекомбинатора ПКРВ начинается с момента поступления водорода, содержащегося в атмосфере гермозоны к катализатору. В порах катализатора происходит экзотермическая химическая реакция соединения водорода и кислорода. Теплота, выделяемая в ходе протекания химической реакции, разогревает катализатор и газ, что создает конвективный поток газа в корпусе. Газ с продуктами дожигания водорода через выходное отверстие корпуса выбрасывается в атмосферу гермозоны. Процесс рекомбинации водорода протекает на границе поверхности катализатора и газовой среды.

### **Система контроля концентрации водорода (СККВ)**

Система СККВ является системой безопасности, необходимой для измерения концентрации водорода в атмосфере гермооболочки АЭС с реакторами типа ВВЭР.

СККВ обеспечивает выполнение комплексного анализа состояния среды защитного герметичного ограждения в нормальных условиях эксплуатации, при нарушении нормальных условий эксплуатации, при проектных и запроектных авариях и обеспечивает передачу информации оперативному персоналу.

СККВ представляет собой структуру, включающую в свой состав:

- 1) Аппаратуру нижнего уровня:
  - средства измерения концентрации водорода – газоанализаторы водорода ГВ-01;
  - измерительные комплексы газоанализаторов водорода и кислорода (ГВК);
- 2) Аппаратуру среднего уровня:
  - аппаратура для обработки измеряемых значений концентрации водорода и кислорода, температуры и давления – аппаратно-программный анализатор (АПА);
  - шкафы системы – местные щиты управления МЩУ;
- 3) Аппаратуру верхнего уровня:
  - аппаратура для автоматического определения, отображения, регистрации и хранения

измеряемых параметров в контролируемых точках – блок отображения сигналов БОС;

- передвижная газовая станция для проверки газоанализаторов водорода и кислорода ПЕГАС;

В качестве примера рассмотрим аппаратуру нижнего уровня. К средствам измерения концентрации водорода относят - стационарный газоанализатор водорода ГВ-01, предназначенный для измерения объемной концентрации водорода и температуры в атмосфере герметичного ограждения АЭС в составе системы СККВ.

Газоанализатор водорода стационарный состоит из первичного измерительного преобразователя (датчика), устанавливаемого в помещении с контролируемой газовой средой, и измерительного блока, размещаемого в помещении электронных средств АСУ ТП внутри шкафа МЩУ (местного щита управления). Датчик и измерительный блок соединены магистральными кабелями.

Измерительный блок газоанализатора имеет встроенный датчик для измерения температуры окружающей среды.

Принцип действия датчика газоанализатора водорода основан на свойстве проводника из сплава палладий-серебро поглощать водород из анализируемой газовой смеси и изменять при этом свое электрическое сопротивление. Количество поглощенного водорода пропорционально его объемной концентрации в газовой смеси, а изменение электрического сопротивления пропорционально количеству поглощенного водорода. По величине изменения сопротивления проводника определяется концентрация водорода в контролируемой газовой смеси.

Измерительный комплекс газоанализаторов водорода и кислорода предназначен для измерения объемных концентраций водорода и кислорода, а также температуры в атмосфере герметичного ограждения АЭС в составе системы СККВ.

Измерительный комплекс ГВК состоит из двух газоанализаторов водорода ГВ-01, газоанализатора кислорода ГК, удалителя газовой компоненты (ремувера), датчика температуры и вторичных измерительных блоков (два для ГВ-01 и один для ГК), размещенных в шкафах МЩУ (местных щитов управления). Датчики и измерительные блоки соединены магистральными кабелями.

В ГВК используется принцип измерения концентрации кислорода в объеме, освобожденном от водородной газовой компоненты. Реализована структура, в которой производится

измерение концентрации водорода на входе измерительного комплекса ГВК, удаление водородной составляющей в камере анализируемого объема среды и измерение в ней концентрации кислорода, а также измерение температуры газовой среды.

К аппаратуре среднего уровня относят аппаратно-программный анализатор АПА, который предназначен для измерения входных аналоговых сигналов газоанализаторов водорода ГВ-01, кислорода ГВК и датчиков давления в виде силы постоянного электрического тока и входных аналоговых сигналов сопротивления платиновых термометров, преобразования полученной информации и формирования выходных данных в цифровом виде в составе системы контроля концентрации водорода СККВ. Аппаратно-программные анализаторы размещаются в шкафах МЦУ. Функции АПА обеспечивают:

- регистрацию сигналов газоанализаторов водорода ГВ-01, измерительных комплексов ГВК (в т. ч. датчиков температуры) и датчиков давления;
- циклический опрос входных сигналов, их преобразование в цифровой код, первичную обработку и запись результатов в собственную оперативную память;
- вычисление значений выходных сигналов с помощью записанных в память констант преобразования;
- формирование и передача выходных сигналов.

В состав аппаратуры входят контроллер, блок питания, модули ввода-вывода. Все модули связаны между собой информационной магистралью, крепятся на DIN-рейке и располагаются в защитном корпусе.

Изделие является функционально законченным устройством и готово к работе после включения питания. Набор всех необходимых для функционирования АПА компонент, установленных при изготовлении, обеспечивает автоматический запуск АПА и возможность удаленного контроля работоспособности его составных частей. При построении аппаратуры использован принцип программно-управляемой магистрально-модульной структуры. Конструктивно аппаратура выполнена в виде бокса. Внутри бокса располагается DIN-рейка, на которой крепятся блок питания, контроллер, модули ввода-вывода. В нижней части бокса расположены кабельные вводы для подведения кабелей входных, выходных сигналов и сетевого питания.

К аппаратуре верхнего уровня относят блок

отображения сигналов БОС, который предназначен для выполнения сервисных функций в составе системы контроля концентрации водорода. Отображение сигналов оборудования контроля концентрации водорода осуществляется с помощью расположенного в помещении оперативного персонала дисплея оператора с мнемосхемой в виде индикаторов текущего состояния и значений концентрации водорода, кислорода и температуры по точкам контроля с сигнализацией в случае превышения допустимых в проекте значений.

Функции БОС обеспечивают:

- отображение текущих значений параметров концентрации водорода, кислорода и температуры в точках контроля;
- архивирование данных по концентрациям водорода и кислорода по помещениям гермозоны в течение компании;
- прогнозирование изменения концентрации водорода в стационарных и динамических режимах;
- обеспечение сервисных функций при проведении периодических проверок оборудования.

БОС является функционально законченным устройством и готов к работе после включения питания. Набор всех необходимых для функционирования БОС компонентов, установленных при изготовлении БОС, обеспечивает его автоматический запуск и возможность удаленного контроля работоспособности его составных частей.

В состав аппаратуры входят: источник бесперебойного питания, панельный компьютер, клавиатура, мышь, бокс с источником питания и концентратором Ethernet-ВОЛС.

Работа аппаратуры происходит следующим образом:

- запуск программы осуществляется автоматически при включении питания;
- панельный компьютер БОС производит периодическую выдачу запроса на прием массива параметров по каждому из двух каналов связи Ethernet по протоколу TCP/IP;
- прием массива параметров по концентрации водорода, кислорода и температуре в точках контроля от оборудования контроля концентрации водорода по линиям связи через концентратор Ethernet-ВОЛС протоколом TCP/IP;
- сравнение параметров концентрации водорода с аварийной уставкой;

- отображение параметров концентрации водорода, кислорода и температуры по каждой точке контроля с изменением цвета мнемосхемы в соответствии с уставкой;
- сохранение параметров в архиве и формирование отчета перехода значений параметров за уставку за период кампании.

Архив параметров содержит в каждой записи: дату, время, значение параметра концентрации водорода, значение параметра температуры в точках контроля и значение давления в гермозоне. Для каждого канала отдельный файл архива. Период записи данных в архив составляет 30 секунд. Каждый месяц создается новый файл архива.

К аппаратуре верхнего уровня так же относятся передвижную газовую станцию ПЕГАС, которая предназначена для поверки газоанализаторов водорода ГВ-01 и кислорода ГК системы контроля концентрации водорода СККВ. Внешний вид которой показан на рис.3.



Рис.3 Передвижная газовая станция ПЕГАС

Станция обеспечивает поверку и градуировку газоанализаторов без их демонтажа путем подачи на вход газоанализаторов эталонных газовых смесей и сравнения показаний газоанализаторов с паспортными данными смесей.

Передвижная газовая станция представляет собой металлический шкаф с дверцей в задней части. Для удобства эксплуатации он установлен на поворотные ролики. Внутри шкафа находятся установочные места для 3-х баллонов с газовыми смесями. Баллоны жестко фиксируются стальными держателями. Кроме того, внутри шкафа имеются 3 гибких шланга высокого давления, на концах которых установлены фильтры тонкой очистки и накидные гайки для

подключения к баллонам.

На передней стенке шкафа размещены органы управления и индикации станции:

- 3 манометра, показывающие давление в баллонах;
- переключатель поверочной смеси;
- ручка вентиля регулировки расхода;
- индикатор расхода;
- выходной штуцер.

Поверочные газовые смеси из баллонов поступают на фильтры тонкой очистки, со сменными фильтрующими элементами. С выхода фильтров смеси по гибким шлангам поступают на манометры, расположенные на передней стенке станции, а также на переключатель поверочной смеси. Переключатель смеси позволяет выбрать один из трех баллонов, либо отключить подачу смеси на выход станции. С выхода переключателя выбранная смесь поступает на встроенный редуктор, который понижает давление смеси до уровня  $0,8 \div 1,0 \text{ кг/см}^2$ .

Газовая станция поставляется в собранном виде и является передвижным устройством, готовым к эксплуатации, поэтому проведение монтажных работ не требуется. Необходимо периодически проводить калибровку следующего оборудования, входящего в состав ПЕГАС:

- манометры – согласно МИ 2124-90 периодичность калибровки 2 года;
- индикатор расхода – согласно ГОСТ 8.122-99 периодичность калибровки 2 года.

Изъятие оборудования из станции при калибровке не требуется. Калибровка производится с использованием рабочих трубопроводов ПЕГАС.

### Методы точного обнаружения утечек

Наиболее простым и доступным является метод обнаружения утечек с помощью акустических детекторов. Эти портативные приборы просты в использовании, не требуют специального обучения, выявляют утечки с расстояния. Имеют регулировку чувствительности датчика и уровня громкости наушников, входящих в состав комплекта. С помощью гибкого накопчика можно находить утечки в труднодоступных местах[5]. Основным преимуществом является возможность поиска различных типов газов. К недостаткам можно отнести: ограниченное расстояние определения источника утечки, сложность в интерпретации данных, даже для опытного дефектоскописта. Есть большая вероятность принять высокочастотный

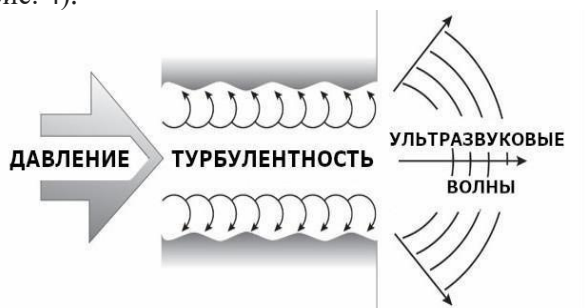
шум или вибрацию за утечку. В большинстве случаев простые акустические детекторы с одним микрофоном необходимо будет комбинировать с классическими методами поиска утечек.

Из дистанционных способов можно выделить использование визуально-акустического течеискателя. Прибор позволяет на расстоянии обнаружить утечку газов, измерить объем газа.

Визуально-акустический течеискатель выполнен в корпусе мобильной камеры. Основной рабочий орган – параболические микрофоны. Они регистрируют ультразвук в диапазоне частот 2-35 кГц. Большое количество встроенных микрофонов позволяет дефектоскопу выполнять свою функцию с большой точностью и отсеивать ложные сигналы-помехи.

В области технологии ультразвуковой дефектоскопии Финский производитель Noiseless Acoustics Ltd разработал визуально-акустический дефектоскоп NL-камера, которая благодаря 124 сверхчувствительным микрофонам способна находить различные источники звука в диапазоне от 2 до 65 кГц, в зависимости от выбранных настроек. Алгоритм искусственного интеллекта на основании данных тысяч измерений сопоставляет и локализует дефект и его характер максимально точно.

Прибор работает, обнаруживая ультразвуковой сигнал утечек, вызванных турбулентностью газа, создаваемой перепадом давления (рис. 4).



**Рис.4.** Ультразвуковой сигнал, вызванный турбулентностью газа.

Звуковая волна достигает микрофонов прибора менее чем на 1 мсек., этого времени достаточно, чтобы 4-х ядерный процессор ARM 1.4 ГГц обработал сигнал, обнаружил местоположение источника звука и визуализировал его.

Для ультразвуковой визуализации с большим количеством микрофонов можно провести аналогию с матрицей тепловизора: каждый микрофон подобен пикселю матрицы, и чем больше этих “пикселей”, тем точнее акустиче-

ское изображение, и с большего расстояния мы можем инспектировать объекты.

Промышленный шум менее мешает прибору на высоких частотах. С утечками газов обычно можно добиться хороших результатов, если сконцентрироваться на звуках выше 20 кГц. NL камера моментально обнаруживает звуки, в диапазоне возникновения утечки газов, что дает лучшие результаты с меньшими усилиями пользователя при диагностике. По умолчанию камера не воспринимает почти весь мешающий шум.

Одним из эффективных методов дистанционной визуализации утечек является метод с использованием инфракрасного излучения, в частности инфракрасная камера. Этот прибор позволяет обнаружить невидимый газ и визуализировать его на дисплее в виде газового облака или потока.

Для визуализации газов применяют тепловизор. Конструктивно тепловизор представляет собой портативный прибор, оснащенный объективом, экраном. Основной рабочий орган – инфракрасный детектор в качестве чувствительного элемента. Электроника обрабатывает сигнал с детектора. На экран выводится термограмма.

Работа таких устройств основана на том, что газ поглощает инфракрасный спектр в определенном диапазоне. Чувствительная камера определяет, какой конкретно диапазон инфракрасного излучения поглощен и визуализирует это место. Такие камеры созданы на основе самых современных технологий и обладают сверхчувствительными детекторами. Каждый прибор имеет встроенный специальный фильтр OGI (optical gas imaging – визуализация газов). Фильтр ограничивает длину волны распространения газа, отвечает за визуализацию и вывод графической информации о локализации утечки на экран устройства.

Все объекты испускают и отражают инфракрасное излучение, совокупность этих излучений мы назовем фоновым излучением. Когда это излучение попадает в объектив ИК-камеры, оно проходит через линзу до фильтра, который пропускает на детектор длины волн, соответствующие газам, для поиска которых предназначена данная камера.

Таким образом, если между фоновыми объектами и ИК-камерой находится утечка газа – “газовое облако”, это облако поглощает часть фонового излучения в спектре соответствующего газа. При этом количество излучения, передаваемого детектору, будет меньше, что позволяет камере визуализировать газ (рис.5).

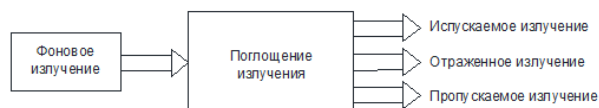


Рис. 5. Эффект газового облака.

Своевременная локализация утечек газов является важной частью диагностики, потому что утечки могут привести к авариям, отравлению персонала и большим финансовым потерям.

### Заключение

Перспективным направлением в области диагностики является контроль утечек газа на АЭС. Существующие системы по контролю концентрации газа в гермообъеме не дают представление о точном месте утечки, поэтому требуется последующие разработки и усовершенствования. Считаем, что хорошо зарекомендовали в работе методы дистанционной визуализации и точного обнаружения утечек путем ультразвуковой дефектоскопии и инфракрасного диагностирования.

Таким образом, разработка и внедрение систем для безопасной работы АЭС является задачей актуальной и необходимой.

### Список литературы

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций. / В.А. Острейковский – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
2. Бахметьев А.М., Самойлов Г.Б., Усынов О.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.
3. Шкаровский А.Н., Аксенов В.И., Сердунь Н.П. Исследование аварийных ситуаций с малыми течами первого контура реактора ВВЭР-1000// Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2004. – №3. – С. 64-69.
4. Радиоактивные компоненты АЭС: обращение, переработка, локализация: учебное пособие для вузов / М.А. Скачек. – М. : Издательский дом МЭИ, 2014. – 552 с.: ил.
5. Методы визуализации утечек газа [Электронный ресурс] URL: <https://chemtech.ru/vizualizacija-uglevodorodov/> (дата обращения 19.06.2021)

### Reference

1. Ostrejkovskij V.A. Ekspluatatsiya atom-nyh stancij. / V.A. Ostrejkovskij – M.: Energoatomizdat, 1999. – 928s.
2. Bahmet'ev A.M., Samojlov G.B., Usynov O.B. Metody ocenki i obespecheniya bez-opasnosti

YAEU. – М.: Energoizdat, 1988. – 136s.

3. SHkarovskij A.N., Aksekov V.I., Serdun' N.P. Issledovanie avarijnyh situacij s malymi techami pervogo kontura reaktora VVER-1000// Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. YAdernaya energetika. – 2004. – №3. – S. 64-69.
4. Radioaktivnye komponenty AES: obra-shchenie, pererabotka, lokalizaciya: ucheb-noe posobie dlya vuzov / M.A. Skachek. – M. : Izdatel'skij dom MEI, 2014. – 552 s.: il.
5. Metody vizualizacii utochek gaza [Elek-tronnyj resurs] URL: <https://chemtech.ru/vizualizacija-uglevodorodov/> (accessed 19.06.2021)

---

**АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ**

---

УДК 004.032.26:620.22

**Использование свёрточных нейросетей для идентификации структур металлов и сплавов при микроструктурном анализе**А.В. Исаев<sup>1</sup>, О.В. Матузаева<sup>2</sup>, С.В. Максимов<sup>1</sup>, А.А. Назаркин<sup>1</sup><sup>1</sup>ФГБВОУ ВО «Черноморское высшее военно-морское ордена Красной Звезды училище имени П.С. Нахимова»  
Дыбенко Павла, 1А, г. Севастополь, 299028, Россия, alexey9588@yandex.ru<sup>2</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,  
Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, ovmatuzaeva@sevsu.ru

Статья поступила 17.06.2021 г.; после доработки 21.06.2021 г.

---

**Аннотация**

Предложен способ использования свёрточных нейросетей для идентификации структур металлов и сплавов при микроструктурном анализе.

Ключевые слова: свёрточные нейросети, идентификация, структуры металлов и сплавов, микроструктурный анализ.

---

**Using convolutional neural networks to identify structures of metals and alloys in microstructural analysis**A.V. Isaev<sup>1</sup>, O.V. Matuzaeva<sup>2</sup>, S.V. Maximov<sup>1</sup>, A.A. Nazarkin<sup>1</sup><sup>1</sup>Black Sea Higher Naval College named after P.S. Nakhimova, 1A Dybenko Pavla st., Sevastopol, 299028, Russia,  
alexey9588@yandex.ru<sup>2</sup>Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ovmatuzaeva@sevsu.ru

Received 17.06.2021 y. received in final form 21.06.2021 y.

---

**Abstract**

A method of using convolutional neural networks for the recognition of marine targets in images is proposed for consideration.

Keywords: convolutional neural networks, recognition, marine targets, images.

---

**Введение**

История знает немало примеров, когда выполненные на высоком качественном уровне технологические объекты служат многие десятилетия. Например, до настоящего времени успешно выполняет свои задачи в составе Черноморского флота спасательное судно «Коммуна» (рис. 1 а), корпус которого был склёпан 106 лет назад на заре подводного флота.

Есть и совершенно противоположные примеры, когда небольшой дефект или низкое качество отдельных деталей конструкции приводили к катастрофе. Так сотрудники правительственного

Национального института стандартов и технологий США (NIST) на протяжении 10 лет исследовали образцы обшивки и 48 заклёпок, поднятые с «Титаника» (рис. 1 б).

В результате в заклёпках, выполненных из ковального железа, было обнаружено 4-кратное превышение содержания шлака, оставшегося после выплавки металла. Это привело к значительному снижению их прочности и увеличению хрупкости при пониженных температурах.

Поэтому, как утверждает специалист по металлам Тимоти Фокке (Timothy Foecke), автор «теории заклёпок», в момент столкновения

судна с айсбергом произошло разрушение клёпанного соединения листов обшивки корпуса на протяжении примерно 90 м. Можно назвать целый ряд причин, приведших к катастрофе огромного лайнера и гибели более чем 1,5 тысяч людей, но первая в этом ряду – это выбор материала низкого качества для совсем небольших по размерам деталей.



а)



б)

**Рис. 1.** а) судно-спасатель «Коммуна»; б) трансатлантический пароход «Титаник».

Из-за низкого качества исходных материалов и конечных изделий индустриально развитые страны теряют до 10 % валового продукта – такой вывод был сделан на 15-й конференции Европейской организации по контролю качества. Снизить эти потери можно только с помощью различных средств контроля качества.

Так в [1] говорится, что компания Bradken Inc. – ведущий поставщик высококачественного металла на верфи Electric Boat и Newport News Shipbuilding продавала некачественный металл для строительства атомных подлодок ВМС США. Фальсификация результатов исследований корабельной стали продолжалась десятилетиями.

В 2008 г. фирма купила металлургический завод в Такоме (северо-запад США). Спустя 9 лет при смене руководства предприятия обнаружилось, что прежний директор завода, 66-летняя Элейн Томас с 1990 гг. подделывала результаты анализа 240 партий стали для корпусов субмарин – это половина всего металла, поставленного

Bradken для нужд американского флота.

На допросе у федерального следователя Томас признала, что изменения в документах, фиксирующих результаты испытаний металла, внесены ее почерком, но она не думала, что «намеренно фальсифицировала результаты теста и не имела мотива для изменения результатов». Однако на другом допросе она согласилась, что у той или иной отливки был низкий предел текучести и ее никогда не следовало отправлять на верфь. А ведь когда-то Элейн Томас была награждена государственной премией за разработку процедуры по изготовлению технически сложных сплавов для ВМС.

Если верить обвинениям в адрес верфи, реальная текучесть сплавов, из которых делали АПЛ, была ниже, чем заложенная в проекте, а соответствующие документы были фальсифицированы. Металлы с разным пределом текучести используются в различных сферах при неодинаковых условиях эксплуатации. Текучесть металла, которая подойдет для надводного кораблестроения, – не пойдет для подводного, где может быть совершенно другое давление.

Экспертом в [2] отмечено, что предел текучести – очень важный показатель для металла. Чем более высок предел текучести, тем большей прочностью обладает сплав и тем большее забортное давление может выдерживать подводная лодка. Следовательно, от предела текучести сплава зависит предельная глубина погружения подводной лодки, а это прямо влияет на ее способность выполнять боевые задачи.

При этом снижается боевая устойчивость (повышается боевой радиус поражения и внутренний взрыв приведет к более обширным разрушениям) и срок службы (если материал окажется некачественным, например, из-за минеральных добавок, то в месте сварочных швов может возникнуть чрезмерное напряжение, и это спровоцирует более интенсивный процесс старения корпуса) подводных лодок.

Также известны факты, что если средние расходы на контроль качества составляют до 3 % от цены готового продукта, то в таких промышленных как оборонная, атомная и аэрокосмическая они возрастают до 18 %. В судостроении на контроль качества сварных швов тратится до 5 % от стоимости узлов и материалов, в ракетной технике – 20 %, а при прокладке нефте- и газопроводов большого диаметра – до 10 %.

Неотъемлемой частью системы контроля качества является микроструктурный анализ, который проводится на начальном этапе создания новой техники – стадии научно-исследовательских

и опытно-конструкторских работ при подборе материалов согласно ТЗ. Микроанализ, проводимый на специально изготовленных образцах – микрошлифах – с помощью оптических или электронных микроскопов, помимо характеристик структуры материала позволяет определить наличие таких дефектов как: пережог при сварке, обезуглероживание поверхности в стальных изделиях, неметаллические включения, микротрещины [3, 4].

В то же время микроанализ, как и все методы контроля, основанные на визуальном осмотре поверхностей деталей, малопроизводительный, трудно поддаётся автоматизации и является субъективным, так как достоверность его результатов существенно зависит от опыта, квалификации и даже самочувствия дефектологов. На данный момент эта задача решается материалами традиционно – путём сравнения видимой ими в окуляре микроскопа структуры с образцами в альбоме микроструктур [5].

### Постановка задачи

Исходя из приведенных фактов и соображений, возникла идея использовать элементы искусственного интеллекта, на примере применения свёрточных нейросетей с глубоким обучением [6], в микроскопическом анализе с целью устранения его недостатков, а в дальнейшем возможного уменьшения затрат, связанных с использованием в технике как гражданского, так и военного назначения материалов и узлов низкого качества.

Поэтому, целью данной статьи является обоснование способа использования свёрточных нейросетей для идентификации структур металлов и сплавов при микроструктурном анализе.

В исследованиях была задействована испытательная установка, состоящая из микроскопа металлографического 4XB с цифровой фотокамерой TourCam, встраиваемой в гнездо вместо одного из окуляров. Камера подключалась к компьютеру, на котором с помощью специальной программы можно получать, обрабатывать и хранить цифровые изображения микроструктур. Микрошлифы для изучения располагались на рабочем столе микроскопа. С помощью макро- и микровинтов происходила настройка резкости, а затем регулировочными винтами – горизонтальное перемещение рабочего стола, после – фотографирование различных участков наблюдаемой поверхности (рис. 2).

Был отобран наиболее характерный 41

шлиф (нем. schliff, от schleifen – точить) различных материалов 6-й групп (учебные образцы кабинета материаловедения):

углеродистые стали (конструкционные – марки 10, 20, 35, 45, 65, 80 и инструментальные – марки У8, У12);

чугуны (белый доэвтектический, эвтектический и заэвтектический; серый с ферритной, ферритно-перлитной и перлитной основой; ковкий на ферритной основе: высокопрочный на ферритно-перлитной основе);

легированные стали (марки 25X13H2, 08X18H10T, 40XC2M, ШХ15, ХВГ, Р18, Х12М, 30ХГС);

термически обработанные стали (марки 45 (отжиг при 840° С), 45 (нормализация при 840° С), 45 (закалка с 840° С в воде), 45 (закалка с 840° С в масле), 45 (закалка с 1000° в воде), 45 (закалка с 740° С в воде), 45 (закалка с 840° С в воде с отпуском 400° С), 45 (закалка с 840° С в воде с отпуском 600° С);

цветные металлы и сплавы (медь марки М1, бронзы БрАЖ9-2, БрОФ6-0,15, латуни ЛС59-1 и Л63, алюминиевые сплавы Амг6Т, Д16, титановый сплав ВТ6);

конструкционные материалы (сталь марки 20 после цементации, сталь с никелевым покрытием).

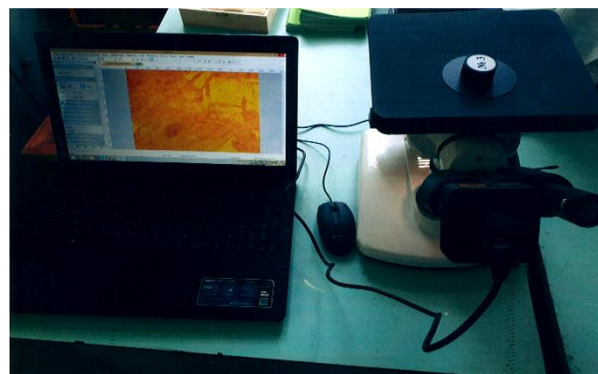


Рис. 2. Экспериментальная установка.

Поскольку все эти шлифы активно используются в учебном процессе уже более 3-х лет, то кроме дефектов внутреннего строения на них появились поверхностные дефекты – царапины от постоянного соприкосновения со столом металлографического микроскопа и пятна ржавчины от атмосферной коррозии.

Вначале эксперимента на каждом шлифе были сняты 10 и более участков с различными дефектами. Затем был выбран участок в качестве образца без дефектов и также зафиксирован.

Всего получилось около 450-и цифровых изображений. После их «перемешивания» и выбора в случайном порядке нейросети идентифицировали микроструктуру и, следовательно, определили какому материалу она принадлежит.

Необходимо отметить, что бурно развивающиеся и получившие широкое распространение в последнее десятилетие свёрточные нейросети, на основе глубокого обучения, успешно применяются для решения задачи идентификации различных объектов. В отличие от классических многослойных персептронов, где на вход сети изображение подается в виде одномерного вектора, на вход свёрточной нейросети подаются двумерные, а в некоторых случаях трехмерные матрицы. Изображения имеют строгую двумерную структуру, в которой существует зависимость между пространственно-соседними пикселями, и нейросети учитывают эту топологию входных данных [7].

Рассмотрим использование свёрточной нейросети на примере 25-слойной нейросети, прототипом которой является сеть Alexnet. Графически её архитектура в виде специализированных слоёв, отображенных различными цветами, представлена на рис. 3.

Начальный и конечный участки структуры нейросети отображены на рис. 4. Директория хранения изображений нейросети показана на рис. 5.

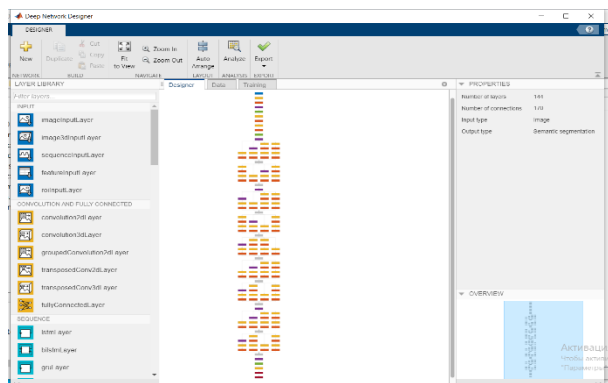
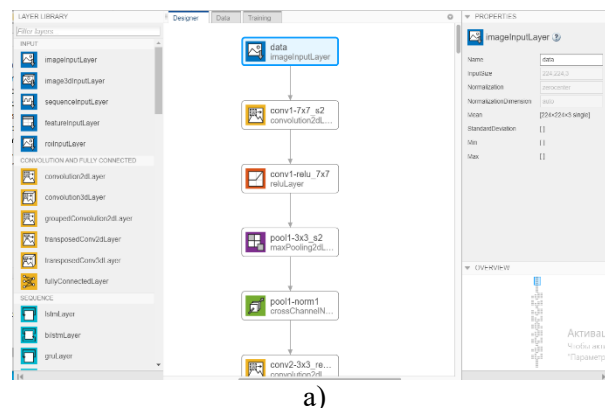


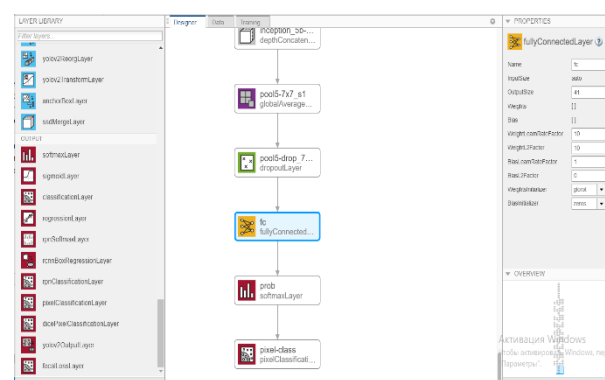
Рис. 3. Графическая архитектура свёрточной нейросети Alexnet.

К особенностям свёрточной нейросети можно отнести следующие: в качестве функции активации вместо арктангенса (нелинейность модели) используется слой Relu, что в условиях равной точности методов увеличивает скорость обработки данных в 6 раз; вместо регуляризации для переобучения применяется слой дропаута (прореживание, исключение), что, однако, увеличивает время обучения вдвое; производится

перекрытие объединений для уменьшения размера нейросети [8, 9].



а)



б)

Рис. 4. Участки структуры нейросети: а) начальный и б) конечный.

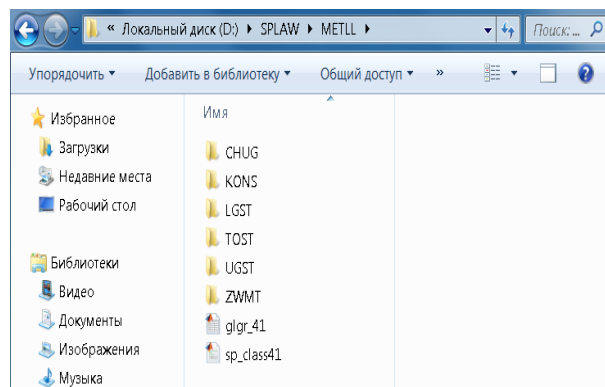


Рис. 5. Директория хранения изображений нейросети.

Остановимся подробнее на работе компьютерной программы идентификации свёрточной нейросетью шифров. В начале её работы (файл с именем isdat\_cr.m) производится загрузка свёрточной нейронной сети (файл layers\_1.mat). Далее следует подготовка исходных данных.

Основные условия, определяющие подготовку исходных данных следующие: размер

входного полноцветного изображения (true color) – 227x227x3 (пикселя); допустимые расширения файла – \*.jpg и \*.png; данный образец сети распознаёт 41 класс, что видно из параметров последнего полносвязного слоя.

Эти условия определяют создание специальной структуры ImageDataStore (хранилище изображений). В параметрах функции указывается полный путь к основной папке (METLL). Имя каждой из них – метка (label) класса шлифов, подлежащих распознаванию. База данных изображений представляет древовидную структуру: 6 основных папок (по числу групп шлифов), где в каждой папке имеются вложенные папки по числу марок шлифов.

Подготовка данных для использования в сети [10] проводится следующим образом:

а) создание репозитория (структуры) данных, обеспечивающего ввод изображений (ImageDataStore) в свёрточную нейросеть. Наибольший интерес представляют поля Files и Labels. Рисунок 6 частично раскрывает поле Files в виде внутренней структуры, каждой записи которой соответствует категориальная метка в поле Labels;

б) пропорциональное разделение содержимого ImageDataStore. функцией splitEachLabel и получение двух пакетов обучения (aidsTrain) и валидации – проверки данных на соответствие заданным условиям и ограничениям (идентификация по независимым данным, aidsValidation) в соотношении 0,7:0,3;

в) создание увеличенных пакетов обучения (augAidsTrain) и валидации (augAidsValidation) с помощью функции augmentedImageDatastore, при реализации которой проводится операция предварительной обработки (приведение размеров изображений к входным размерам сети);

г) задание размера мини-пакета обучения (miniBatchSize);

д) определение частоты сетевой валидации (valFrequency);

е) задание опций для обучения свёрточной нейросети функцией (trainingOptions): sgdm – опция решателя, обозначающая метод обучения – стохастический градиентный спуск; MiniBatchSize – размер мини-пакета обучающих данных, предназначенный для использования в каждой итерации с целью оценки градиента функции потерь и обновления весов; MaxEpochs – максимальное количество эпох. В отличие от итерации, которая является одним шагом в алгоритме градиентного спуска с минимизацией функции потерь, эпоха – передача всего учебного алго-

ритма по целому набору обучающих данных; InitialLearnRate – начальный темп обучения.

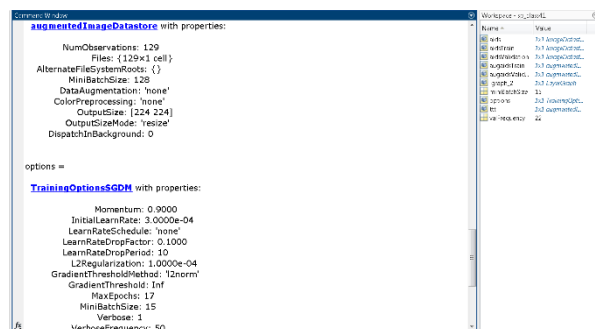


Рис. 6. Структура ImageDataStore нейросети.

На этом подготовка данных для обучения и валидации нейросети считается завершённой. Далее осуществляется обучение и валидация нейросети. Для чего используется функция обучения trainNetwork с входными параметрами: augAidsTrain (расширенный пакет обучения) и layers\_1.mat (нейронная сеть).

Графики идентификации шлифов свёрточной нейросетью с глубоким машинным обучением продемонстрированы на рис. 7: в верхней части продемонстрирована динамика процесса обучения в виде следующих линий: синяя – график обучения нейросети (жирная – сглаженный, тонкая – несглаженный), чёрная – график валидации нейросети; в нижней части: красная – график функции потерь при обучении нейросети (жирная – сглаженный, тонкая – несглаженный), чёрная – график функции потерь при валидации нейросети. Подсвеченные вертикальные области обозначают эпохи. Справа от поля графиков в численно-текстовой форме отображены основные параметры процесса обучения и валидации. На оси ординат – точность идентификации, %.

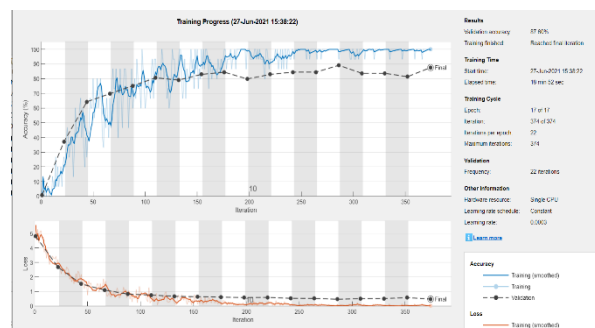


Рис. 7. Графическое отображение параметров процесса: обучения (вверху) и валидации (снизу).

Для сравнения американские ученые разработали и протестировали модель машинного

обучения для распознавания характеристик кристаллической структуры образцов (тип решетки Браве и кристаллографическую группу) по изображениям дифракционных картин, полученных методом дифракции отраженных электронов.

Обе использованные нейросети оказались способны точно (более 80 %) определять эти параметры. Результаты исследования опубликованы в журнале [11].

В отечественной статье [12] для определения пересекающихся классов кристаллических решёток рекомендуется использовать нечёткие нейросети Такаги-Сугено-Канга и Ванга-Менделя. Предложенная трёхэтапная методика обучения нейросетей показала эффективность определения типов кристаллических решёток более 60 %.

Изменения, происходящие внутри деформируемого материала, находят однозначное отражение в изменениях рельефа его поверхности. Оценка напряженно-деформированного состояния исследуемого материала может быть произведена по анализу этого рельефа.

Поэтому изучение зарождения, развития и взаимодействия элементов мезосубструктуры на поверхности позволяет проследить динамику развития процессов, протекающих в исследуемом материале в целом [13].

## Заключение

В результате разработки способа применения свёрточных нейронных сетей для распознавания изображений с использованием [8, 9] получены: архитектура многослойной нейросети с возможностью идентификации 41-го класса шлифов; структура хранения данных с обучающим пакетом и пакетом валидации; графическая фиксация процесса обучения и распознавания независимых данных, а также приемлемые вероятности идентификации нейросетью микроструктур (около 90 %) в виде табличных данных.

Дальнейшие исследования будут связаны с увеличением вероятности распознавания изображений с наращиванием элементов искусственного интеллекта, например, [14] или прецизионное обследование различных поверхностей нанороботами, а также со снижением затрат на предварительную подготовку данных и процесс обучения.

## Список литературы

1. Валагин А. Подлодки США оказались сделаны из некачественной стали. URL: <https://rg.ru/2020/06/16/podlodki-ssha-okazalis-iz->

2. [nekachestvennoj-stali.html](https://news.rambler.ru/weapon.html) (дата обращения: 10.07.2021).
3. Американских подводников подставила женщина. URL: [https://news.rambler.ru/ weapon.html](https://news.rambler.ru/weapon.html) (дата обращения: 10.07.2021).
4. Приборы для неразрушающего контроля материалов и изделий: справочник / под ред. В. В. Ключева. – 2-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
5. Троицкий В.А., Радько В.П., Демидко В.Г., Бобров В.Т. Неразрушающий контроль качества сварных конструкций. – Киев: Техника, 1986. – 158 с.
6. Сухопяткина И.Т. Материаловедение и технология материалов: учебное пособие. – 3-е издание, дополненное. – М.: Инфра-М, 1921. – 396 с.
7. Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб.: Питер, 2018. – 480 с.
8. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Вильямс, 2006. – 1104 с.
9. Медведев В.С., Потемкин В.Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ – МИФИ, 2001. – 630 с.
10. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
11. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. T.1. In Neural Information Processing Systems (NIPS), 2012. – P. 1097 – 1105.
12. Kaufmann K., Zhu C., Rosengarten A.S., Maryanovsky D., Harrington T.J., Marin E., Vecchio K.S. Crystal symmetry determination in electron diffraction using machine learning // Science. – 31 Jan 2020. – Vol. 367. – Issue 6477. – pp. 564 – 568.
13. Солдатова О.П., Лёзин И.А., Лёзина И.В., Куприянов А.В., Кириш Д.В. Применение нечётких нейронных сетей для определения типа кристаллических решёток, наблюдаемых на наномасштабных изображениях // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39. – № 5. – С. 787 – 795.
14. Сырымкин В.И. Современные методы исследования материалов и нанотехнологий: учебное пособие. – Томск, 2013. – 412 с.
15. Сомов С. Н., Баранов Г. В., Поляшов М. А., Пыркин А. А. Роботизированный дефектоскоп для диагностики состояния сварных соединений // Известия ВУЗов. Приборостроение. – 2019. – Т. 62. – № 9. – С. 798 – 802.

## References

1. Valagin A. US submarines were made of low-quality steel. URL: [https://rg.ru/2020/06/16/podlodki-ssha-okazalis-iz-](https://rg.ru/2020/06/16/podlodki-ssha-okazalis-iz-nekachestvennoj-stali.html)
2. The American submariners were set up by a woman. URL: [https://news.rambler.ru/ weapon.html](https://news.rambler.ru/weapon.html) (date of access: 10.07.2021).
3. Devices for non-destructive testing of materials and products: reference book / ed. V. V. Klyueva. – 2-nd

- edition, revised and enlarged. – M.: Mashinostroenie, 1986. – 352 p.
4. Troitsky V.A., Radko V.P., Demidko V.G., Bobrov V.T. Non-destructive quality control of welded structures. – Kiev: Technics, 1986. – 158 p.
  5. Sukhopyatkina I.T. Materials science and technology of materials: textbook. – 3-rd edition, revised. – M.: Infra – M, 1921. – 396 p.
  6. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. Deep learning. – SPb.: Peter, 2018. – 480 p.
  7. Haykin S. Neural networks: a complete course. – M.: Williams, 2006. – 1104 p.
  8. Medvedev V.S., Potemkin V.G. Neural networks. MATLAB 6 / under the general. ed. V.G. Potemkin. – M.: DIALOG - MIPhI, 2001. – 630 p.
  9. Dyakonov V.P. MATLAB. Complete tutorial. – M.: DMK Press, 2012. – 768 p.
  10. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Vol. 1. In Neural Information Processing Systems (NIPS), 2012. – P. 1097 – 1105.
  11. Kaufmann K., Zhu C., Rosengarten A.S, Maryanovsky D., Harrington T.J., Marin E., Vecchio K.S. Crystal symmetry determination in electron diffraction using machine learning // Science. – 31 Jan 2020. – Vol. 367. – Issue 6477. – pp. 564 – 568.
  12. Soldatova O.P., Lezin I.A., Lezina I.V., Kupriyanov A.V., Kirsh D.V. Application of fuzzy neural networks to determine the type of crystal lattices observed in nanoscale images // Computer Optics. – 2015. – T. 39. – № 5. – P. 787 – 795.
  13. Syryamkin V.I. Modern methods of research of materials and nanotechnology: textbook. – Tomsk, 2013. – 412 p.
  14. Somov S.N, Baranov G.V, Polyashov M.A, Pyrkin A.A Robotic defectoscope for diagnostics of welded joints state. Izvestiya Universities. Instrument structure. – 2019. – T. 62. – № 9. – P. 798 – 802.

УДК 621.039.56

## Совершенствование систем внутриреакторного контроля реакторов типа ВВЭР на основе оптических систем

С.А. Качур

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, kachur\_62@mail.ru

Статья поступила 10.06.2021 г.; после доработки 15.06.2021 г.

### Аннотация

Дан анализ работ, выполненных в Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности, с использованием оптических систем для исследования парогенерирующих каналов с целью совершенствования систем внутриреакторного контроля реакторов типа ВВЭР

**Ключевые слова:** космический аппарат, реакторная установка, сети Петри, модель, циклограмма.

## Improvement of in-reactor control systems for VVER-type reactors based on optical systems

S.A. Kachur

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur\_62@mail.ru

Received 10.06.2021 y.; received in final form 15.06.2021 y.

### Abstract

The analysis of the works carried out at the Sevastopol National University of Nuclear Energy and Industry using optical systems for the study of steam generating channels in order to improve the systems of in-reactor control of VVER-type reactors is given.

**Keywords:** in-reactor control system, thermohydraulic process, optical system, information and measurement system.

### Введение

Развитие АЭС идет по пути роста единичной мощности РУ, что позволяет снизить удельный вес затрат на капитальное строительство и эксплуатацию АЭС. Увеличение мощности реактора приводит к увеличению размеров и возрастанию энергонапряженности его активной зоны. Рост удельной мощности приводит к сокращению проектных запасов до предельных состояний топлива и конструкционных материалов. При увеличении размеров активной зоны ухудшается стабильность пространственного распределения нейтронного поля в активной зоне [1].

В этих условиях для обеспечения безопасной эксплуатации реакторной установки необходимо наличие точной и оперативной информации

о распределении полей энерговыделения, температуры и других теплотехнических и ядерно-физических параметров внутри активной зоны. Эту задачу выполняют системы внутриреакторного контроля (СВРК), в состав которых, в общем случае, входят датчики, линии связи, электронная измерительная аппаратура, а также ЭВМ, алгоритмы и программы обработки полученной информации. На основании полученной от датчиков первичной информации рассчитываются и выводятся к оператору энергоблока обобщенные параметры, характеризующие режим работы активной зоны; их также можно использовать для автоматизации управления работой реактора в качестве сигналов защиты при возникновении аномальных ситуаций. В последнем случае резко

возрастают требования к достоверности вырабатываемой информации и надежности работы СВРК в целом, так как она становится частью системы управления и защиты реакторной установки [2, 3].

В настоящее время рассматриваются различные варианты построения измерительно-информационных систем (ИИС) для определения профиля тепловыделения [4-7], которые позволят расширить возможности современных СВРК, а также использование нейронных сетей для повышения быстродействия СВРК [8]. В качестве основы для дальнейших исследований рассматривается оптическая ИИС, представленная в работах [5, 6].

Цель статьи – анализ работ, проведенных в Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности, с использованием оптических систем для исследования парогенерирующих каналов для совершенствования систем внутриреакторного контроля реакторов типа ВВЭР.

### **Экспериментальная установка и автоматизированная система сбора и обработки информации для моделирования аварийных теплогидравлических процессов**

В Севастопольском национальном университете ядерной энергии и промышленности была разработана и построена экспериментальная установка для моделирования стационарных и нестационарных теплогидравлических процессов и вероятных аварийных режимов в кольцевой тепловыделяющей сборке водо-водяного энергетического ядерного реактора [9].

Тяжелая авария водо-водяного энергетического реактора, вызванная разгерметизацией первого контура даже при своевременном сбросе аварийной защиты приводит к выбегу температуры ТВС, что может привести к плавлению оболочки ТВЭЛ или даже ее воспламенению при отсутствии достаточного охлаждения.

Проблема исследования теплофизических процессов при аварийных режимах в каналах активной зоны ВВЭР сводится к решению двух задач теплообмена: внутренней и внешней. Под внутренней задачей понимается оценка температурного поля ТВЭЛ, а решение внешней задачи сводится к определению структуры потока теплоносителя, охлаждающего ТВЭЛ. К числу изучаемых относятся вопросы, связанные с определением границ начала интенсивного поверхностного кипения и начала объемного кипения, иден-

тификации кризиса кипения и исследования кинематических характеристик паровых пузырей при поверхностном и объемном кипении.

Для разработки математических моделей состояния ТВС необходимы результаты экспериментальных исследований быстрых теплогидравлических процессов в ТВС при аварийных режимах, вызванных различными внешними и внутренними возмущениями (разгерметизация контура, высвобождение мощности, остановка циркуляционных насосов и др.) Обеспечение задач как физического, так и математического моделирования аварийных режимов в ТВС ВВЭР настоятельно требует создания специализированных экспериментальных теплофизических установок.

Приведем краткое описание экспериментальной установки.

Основой экспериментальной установки является циркуляционный контур высотой около 4 метров (рис. 1). Принятые на рис 5.5 обозначения: 1 — экспериментальный участок; 2 — подъемный участок; 3 — компенсатор давления; 4 — опускной канал; 5 — циркуляционный насос; 6, 10, 12, 13, 16, 19, 21 — клапаны; 7 — дроссельная шайба; 8 — подогреватель; 9 — расходомер; 11 — охладитель; 14 — воздуходувка; 15 — баллон с азотом высокого давления; 17 — ресивер; 18 — распылитель воды; 20 — змеевик; 22, 23 — ФЭУ; 24 — источник света; 25 — линза; САФЭ — система автоматизации физического эксперимента.

В нижней части циркуляционного контура установки смонтирован экспериментальный участок 1, имеющий вид массивного кольцевого канала с центральным тепловыделяющим элементом. Кольцевой канал переходит в подъемный (тяговый) участок 2, на котором пароводяная смесь является подъемной силой при режимах с естественной циркуляцией. Верхняя часть тягового участка имеет компенсатор давления 3 и переливное устройство для отвода воды в опускной канал 4. В опускном канале поток воды проходит через теплообменник, охлаждаемый встречным потоком обычного или увлажненного воздуха. Охлаждение опускного потока воды воздухом способствует получению плавных динамических характеристик циркуляционного контура установки. После опускного канала поток воды попадает в циркуляционный насос 5. При естественной циркуляции поток теплоносителя имеет возможность проходить в обход циркуляционного насоса. Измерение расхода осуществляется с помощью датчиков расхода двух типов (трубка ВТИ или прецизионный датчик турбинного типа).

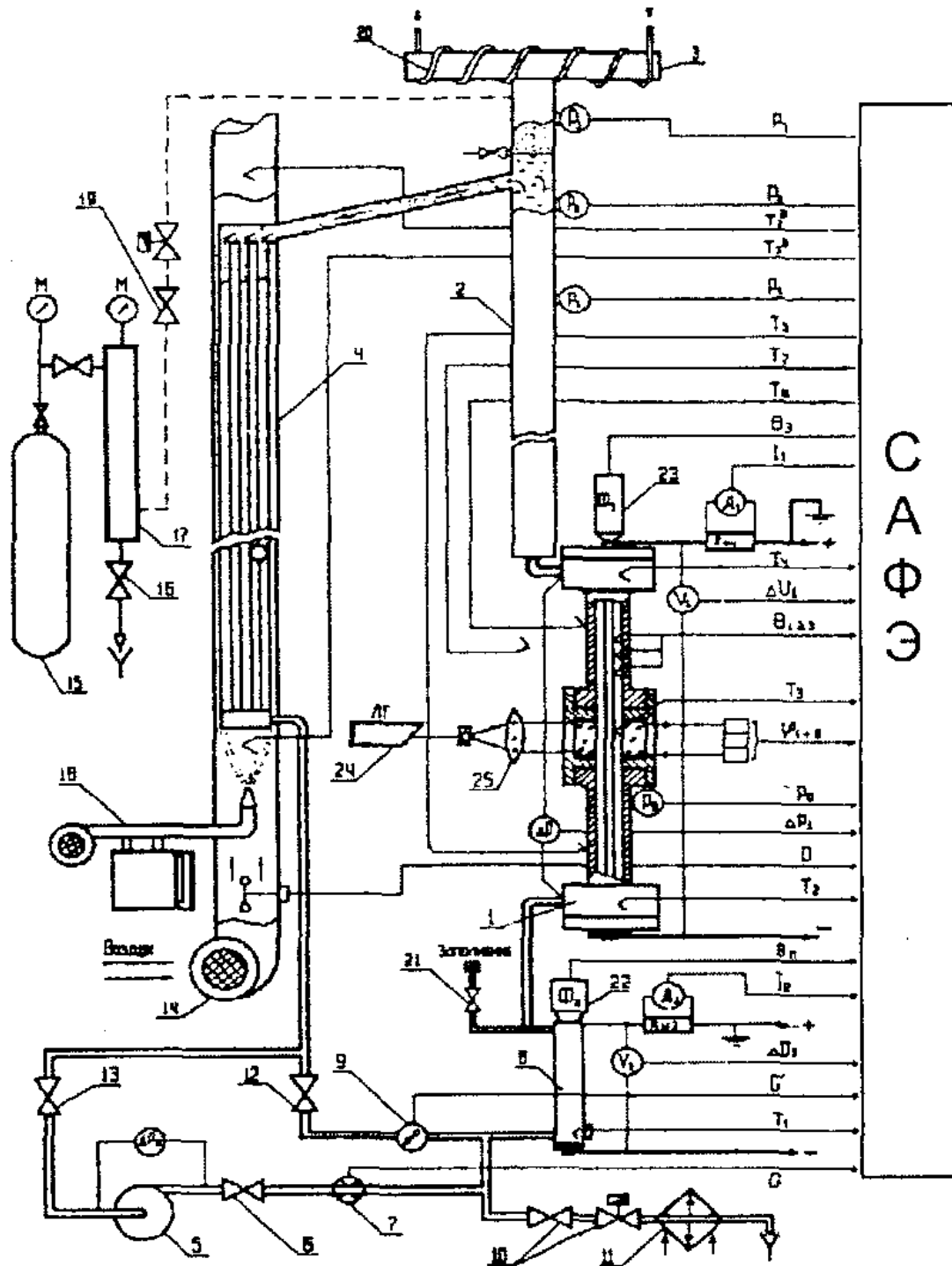


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки

Главной особенностью кольцевого канала ТВС является наличие прозрачного участка, уплотненного в корпусе толстыми оптическими стеклами, рассчитанными на давление до 15,0 МПа.

Луч света от источника, проходящий через прозрачный участок кольцевого канала, попадает на приемное устройство (детектор) и далее через

аналого-цифровой преобразователь в ЭВМ. Данная оптикоэлектронная система, называемая системой технического зрения, предназначена для измерения истинного паросодержания в пароводяном потоке. С помощью этой системы возможно изучение и измерение внутренних характеристик процессов кипения (показатели паросодержания и скопления паровых пузырьков);

изучение процессов конденсации паровых пузырьков в недогретой жидкости.

Методика измерения температуры тепловыделяющего элемента, как было сказано ранее, отличается от традиционно используемых методов и основана на измерении теплового излучения от внутренней полости ТВЭЛ. Для этого в верхней торцевой части экспериментального участка 1 установлен датчик измерения теплового излучения от горячего пятна внутренней полости ТВЭЛ.

Сигнал датчика детектируется фотоэлектронным умножителем, усиливается и затем через АЦП поступает в ЭВМ. При достижении предельной температуры ТВЭЛ ( $650^{\circ}\text{C}$ ) срабатывает аварийная защита, отключающая электрическую цепь генератора тока нагревателя.

Применение безынерционных оптических каналов измерения температуры ТВЭЛ и паросодержания теплоносителя позволяет с достаточной скоростью измерять и фиксировать опытные данные о процессах теплообмена в ТВС. Подобная измерительная информация может быть использована для определения вектора состояния безопасности ТВС.

В экспериментальной установке применяются оптический датчик температуры, детектирующий тепловое излучение от внутренней полости

тепловыделяющего элемента и оптический метод измерения паросодержания потока теплоносителя. Указанные методы измерений позволяют в реальном масштабе времени регистрировать чрезвычайно важные экспериментальные данные о быстрых переходных процессах в кольцевом канале тепловыделяющей сборки при кризисном и закризисном режимах.

### Оптическая измерительно-информационная система для измерения истинных характеристик двухфазного потока

В работе [6] предложен состав и принцип действия ИИС измерения истинных характеристик двухфазного потока на основе принципа технического зрения. Функциональная схема ИИС представлена на рис.2. Принятые на рисунке обозначения: 1 — источника света; 2 — оптический рассеиватель; 3 — экспериментальный канал; 4 — боковые стенки экспериментального канала, уплотненные плоскими толстостенными стеклами; 5 — объектив видеокамеры; 6 — чувствительный элемент видеокамеры; 7 — программно-аппаратный комплекс системы технического зрения; 8 — видеопроцессор; 9 — ПЭВМ; 10 — накопитель; 11 — видеоконтрольное устройство.

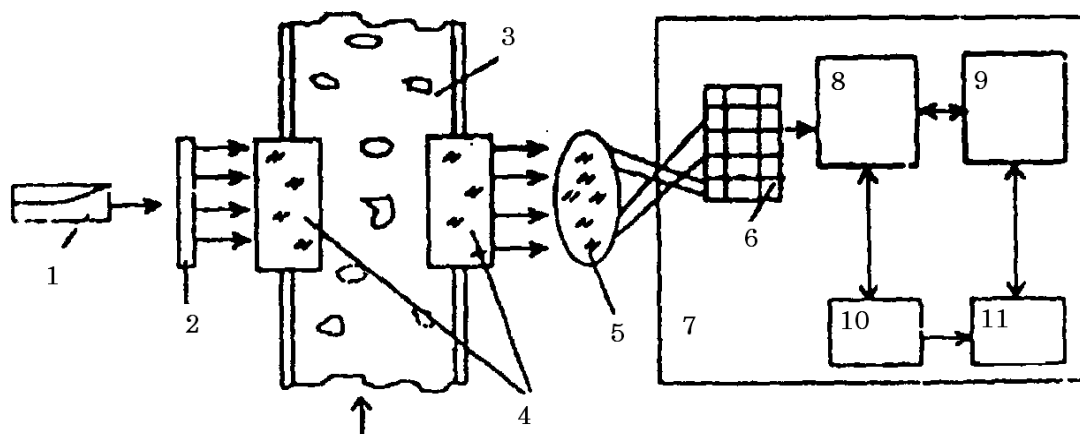


Рис. 2. Принципиальная схема измерительной системы для истинных измерений характеристик двухфазного потока

Световой поток от источника (1), пройдя через оптический рассеиватель (2) и экспериментальный канал (3), боковые стенки которого уплотнены плоскими толстостенными стеклами (4), попадает в объектив (5) видеокамеры (6). В программно-аппаратном комплексе системы технического зрения (СТЗ) (7) формируется ти-

повая картина исследуемого двухфазного потока. Аппаратные средства (7) обеспечивают фиксацию, хранение фрагментов изображения, а также выполняют вычисление истинных характеристик. Чувствительный элемент видеокамеры (6) выполнен на основе ПЗС матрицы, которая позволяет обеспечивать фиксирование без силь-

ных искажений объектов, движущихся со значительными угловыми скоростями в поле кадра. Это достигается сравнительно малым временем фиксации изображения на матрице (до  $10^{-5}$  с) при формировании на выходе камеры стандартного телевизионного видеосигнала с частотой полукадров 50 Гц (100 Гц). Видеопроцессор (8) управляет контроллером ввода изображений (КВИЗ), встроенным ПЗУ и осуществляет предварительную обработку (сжатие), фиксацию и хранение прямоугольных фрагментов нескольких кадров монохроматического изображения. Видеопроцессор осуществляет управление ПЭВМ (9) в моменты пересылки информации, имеющей доступ к элементам изображения для их последующей окончательной обработки. В зависимости от быстродействия ПЭВМ и сложности заданной обработки информации время формирования, расчета и выдачи всех характеристик исследуемого объекта изменяется, и может превысить время 0,02 с.

Для контроля за работоспособностью системы и визуализации протекания процессов в объекте применяется видеоконтрольное устройство (ВКУ) (11). В процессе экспериментального исследования поступающая с телекамеры аналоговая видеоинформация непрерывно записывается в реальном масштабе времени в накопитель (10). Сохраняемая в накопителе видеоинформация в дальнейшем может быть воспроизведена в любой момент времени и проанализирована.

Анализ изображений двухфазного потока, получаемых как результат исследования теплогидравлических процессов в зафиксированных ИИС кадрах, позволяет сделать следующие выводы:

- в кадрах при парогазосодержаниях (до 50%) возможно выделить отдельные пузыри при глубине резко изображаемого пространства 5-10 мм;

- в зависимости от разрешающей характеристики оптического канала и измерительного тракта ИИС, возможно фиксировать изображение пузырей с линейным размером до 0,05 мм;

- следует учитывать, что газовые пузырьки в воде имеют, как правило, правильные геометрические формы, близкие к сфере или эллипсоиду, в то же время границы паровых пузырьков при низких давлениях приобретают сложные, непредсказуемые очертания;

- с увеличением объемного паросодержания в воде толщина просвечивания двухфазной жидкости должна уменьшаться и при паросодержании близкому к 0,5, технологический процесс регистрации отдельных пузырьков и их групп

становится неэффективен;

- основным недостатком применяемого оптического метода является то, что исследуемые изображения повреждаются шумами и помехами различного происхождения, например шумами видеодатчика, ошибками в каналах передачи информации и др.

Распространенный подход минимизации влияния шумов основан на использовании эвристических методов пространственной обработки, среди которых используются алгоритмы, осуществляющие свертку изображений в окне со специально подобранной сглаживающей матрицей — маской.

Однако алгоритмы фильтрации и сглаживания, устраняя высокочастотных, одновременно приводят к потере мелких деталей изображения и к размыванию границ объекта, что напоминает эффект расфокусировки. Поэтому основным этапом обработки изображений является выделение границ объектов по перепаду функции яркости. Этот этап называется бинаризацией.

Экспериментальная установка для применения оптической ИИС представляла собой барботажный участок с вводом воздуха в нижнюю его часть [10]. Через плоские прозрачные стенки из оптического стекла, отделяющих гидравлическую полость, осуществлялись измерения истинных характеристик адиабатного двухфазного потока в пузырьковом режиме: истинного паросодержания и групповой скорости всплывания.

Одна из сторон описываемой ИИС является то, что с ее помощью не только можно судить о структуре двухфазного потока, но и имеется возможность определения истинного паросодержания двумя способами: способом технического зрения и способом расчета корреляционных функций.

Первый способ основан на вычислении доли сечений, занятых паром, к доли сечений общего поля зрения. Вторым способом заключается в вычислении корреляционных функций последовательности кадров и вычислении истинной скорости пара.

### **Метод идентификации внутриреакторных аномалий на основе показаний оптической измерительно-информационной системы и сетей Петри**

Одним из фундаментальных принципов повышения надежности является принцип разнообразия, определяющий применение в разных системах (либо в пределах одной системы в раз-

ных каналах) различных средств и/или аналогичных средств, основанных на различных принципах действия для осуществления заданной функции.

При использовании этого принципа стремятся обеспечить повышение уровня безопасности, исключив методические или типовые недостатки, свойственные оборудованию и таким образом, расширив возможности предотвращения нарушений [4, 7].

Руководствуясь принципом разнообразия, необходимостью совершенствования СВРК с целью получения более полной информации о состоянии реактора, используя существующие эмпирические модели, формулы расчета параметров и статистические данные экспериментов о процессе теплообмена, предлагается метод идентификации внутриреакторных аномалий на основе показаний измерительно-информационной оптической системы [11].

Пусть имеется апостериорная информация, получаемая в дискретные моменты времени от измерительно-информационной системы (ИИС) на основе волоконно-оптических датчиков [6] либо от оптической ИИС. Задача идентификации состояния активной зоны реактора с помощью ИИС включает две взаимосвязанные подзадачи.

1) Идентификация структуры  $S$ , т.е. расположения точек поверхностного и/или объемного кипения в каналах, в результате итеративного поиска наиболее «горячих» точек (НГТ) — максимумов пространственного распределения объемного паросодержания  $\alpha$ . Решение получают на основе использования расширения сетей Петри, предложенного в части 1.

2) Идентификация вектора параметров  $x_{\text{вх}}$  объекта, т.е. определение объемного парообразование  $\alpha$  в определенных структурой  $S$  точках с указанием стадии процесса кипения для каждой точки (I — отсутствие кипения, II — поверхностное кипение, III — объемное кипение, IV — критический процесс кипения). Решение получают в классе моделей с дискретным временем как преобразование

$$[x_{\text{вх}}, S[k]] = \Phi(S[k-1], x_{\text{вых}}[k], M, a, C, k)$$

где  $\Phi$  — преобразование на основе метода наиболее «горячих» точек (МНГТ) и расширения стохастической СП;  $S$  — структура схемы измерения по площади активной зоны реактора;  $x_{\text{вх}}$  — вектор входных параметров процесса;  $x_{\text{вых}}$  — вектор выходных параметров, полученный в результате измерений профиля парообразования в ячейках;  $M$  — статистическая модель состояния

в локальной точке;  $a$  — параметры статистической модели;  $C$  — сеть Петри;  $k$  — номер дискретного момента времени.

Процесс идентификации состояния реактора определяется двумя составляющими: 1) математической структурой модели (априорная информация); 2) измерительной информацией (апостериорная информация). Априорная информация определяет вид математического описания объекта с точностью до коэффициентов (параметров), а апостериорная позволяет численно выразить параметры или коэффициенты математического описания при заданной структуре.

Предлагаемая модель ситуации описывает состояние случайного процесса поверхностного и/или объемного кипения вблизи оболочек твэлов в локальной области канала под воздействием совокупности внешних возмущений случайного характера.

Поскольку местоположение точек кипения априорно не задано, схема эксперимента (измерений) представляется с помощью систем линейных алгебраических уравнений и таблиц покрытий, в которых переменными являются соответственно параметр  $\alpha$  объемное паросодержание и параметр  $d$  диаметр пузыря пароводяной смеси в рассматриваемых точках. В условиях большой априорной неопределенности состояние каналов активной зоны описывается нормальным распределением таких параметров как  $\alpha$  и  $d$ . На основе статистической информации, полученной в результате проведения измерений, рассчитываются значения параметров распределений: оценки математического ожидания и дисперсии.

Структура метода наиболее «горячих» точек (МНГТ) во многом определяется возможностями измерительно-информационной системы (ИИС). ИИС включает аппаратный комплекс (совокупность датчиков и вычислительную технику) и программный комплекс (программно реализованное устройство управления датчиками и программный комплекс обработки результатов измерений). Пусть используется измерительная система на основе волоконно-оптических датчиков (ВОП-датчиков) с сопряженными с ними источниками света.

Предположим, что число используемых в методе датчиков  $k$  и соответственно  $k$  источников света объединено в кольцевую волоконно-оптическую структуру, расположенную по периметру верхней шахты реактора, т.е. каждому датчику или источнику света соответствует определенный сектор этой кольцевой структуры. Разобьем активную зону реактора на  $l$  областей, каждая из которых включает  $p$  зон, состоящих из  $n$

межзонных ячеек, охватывающих  $m$  каналов. Точность метода определяется размером ячейки. Направления измерения датчиков фиксируются под таким углом, чтобы на первом этапе можно было определить объемное паросодержание для всех центров областей, на втором — для центров выбранных зон, на третьем — для центров выбранных межзонных ячеек, на четвертом — два ортогональных профиля тепловыделения ячейки, позволяющих определить объемное парообразование каналов. Причем, для определения информации в конкретных точках (центры ячеек) необходимо выполнение трех условий: а) местоположение центров областей, зон совпадает с ячейками; б) не менее двух линий направления наблюдения пересекается в точке; в) не существует других точек пересечения, кроме указанных.

Измерения производятся в дискретные моменты времени. Устройство управления вырабатывает вектор управляющих сигналов активизации датчиков (подключения источников света), определяя схему измерения в текущий момент времени. Результатом компьютерной обработки информация по  $l$ -у активизированному датчику (направлению наблюдения) измерительной системы в текущий момент времени является:

Использование адаптивной системы управления оптической ИИС на основе МНГТ и моделей СП позволяет примерно в  $10\div 20$  раз повысить быстродействие СВРК при диагностике внутриреакторных аномалий, связанных с нарушением теплообмена.

## Заключение

Проведен анализ научной деятельности И.А. Попова и его учеников в создании экспериментальной установки, разработке оптической системы, методов и моделей обработки информации о состоянии парогенерирующего канала. Выполненные работы позволили моделировать стационарные и нестационарные теплогидравлические процессы и вероятные аварийные режимы в кольцевой тепловыделяющей сборке водо-водяного энергетического ядерного реактора

## Список литературы

1. Мязишев Д.В. и др. Повышение достоверности результатов измерений в информационном пространстве энергоблоков АЭС // Датчики и системы. – 2003. – №7. – С. 29.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынов Г.Б. Методы оценки и обеспечения безопасности

- ЯЭУ – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.
3. Брагин В.А., Батенин И.В., Голованов М.Н. и др. Системы внутри реакторного контроля АЭС с реакторами ВВЭР – М.: Энергоиздат, 1987. – 128с.
4. Волков С.Д., Кебадзе Б.В., Куликов Б.И., Болтенко Э.А. Применение волоконно-оптических датчиков для определения параметров двухфазного потока// Методы и средства измерения тепло физических параметров. Сб. науч. трудов ФЭИ – Обнинск, 1996. – С.220-223.
5. Попов И.А., Ловягин В.А., Сайда Д.М., Матузаев К.Б. Оптическая измерительная система технического зрения для измерения истинных характеристик двухфазного потока // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.5. двухфазные течения. дисперсные потоки и пористые среды – М.: Издательство МЭИ. – 1998. – С.79-81.
6. Попов И.А., Ловягин В.А., Сайда Д.М., Матузаев К.Б. Паросодержание двухфазного адиабатического потока по результатам измерений оптической измерительной системой технического зрения // Труды Второй Российской национальной конференции по теплообмену. В 8 томах. Т.5. двухфазные течения. дисперсные потоки и пористые среды – М.: Издательство МЭИ. – 1998. – С.82-84.
7. Свириденко И.П., Горячев В.В., Покровский Ю.Н. Датчики для измерения профиля тепловыделения // Методы и средства измерения тепло физических параметров. Сб. науч. трудов ФЭИ – Обнинск, 1996. – С.89-97.
8. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
9. Попов И.А., Домашев Е.Д., Сычев Е.Н., Журавлев А.А. Экспериментальная установка и автоматизированная система сбора и обработки информации для моделирования аварийных теплогидравлических процессов // Пром. теплотехника. – 2007. – Т.29, №2. – С.62-68.
10. Нигматулин Б.И., Мелихов О.И., Соловьев С.Л. Состояние и развитие отечественных системных теплогидравлических кодов для моделирования аварийных и нестационарных процессов на АЭС // Теплоэнергетика. – 2001. – №3. – С.17-20.
11. Попов И.А., Качур С.А. Метод идентификации паросодержания в камере смешения ядерного реактора ВВЭР // Сб.наук.тр.СНУЯЭиП – Вып.2(30). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – С.36-43.

## References

1. Myakishev D.V. Improving the reliability of measurement results in the information space of NPP power units. *Datchiki i sistemy*. 2003, No. 7, pp. 29.
2. Bahmetev A.M., Samoylov O.B., Usinov A.M. *Metodi ochenki i obespecheniya bezopasnosti YaEU* [Methods of assessment and providing of the

- NPE safety ]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136p.
3. Bragin V.A., Batenin I.V., Golovanov M.N. *Sistemy vnutrireaktornogo kontrolya AES s reaktorami tipa VVER* [Systems into the reactor control of APP with the PWR reactors]. Moscow, Energoizdat, 1987, 128p.
  4. Volkov S.D., Keadze B.V., Kulikov B.I., Boltenko E.A. The use of fiber-optic sensors to determine the parameters of the two-phase flow. *Metody i sredstva izmereniya teplofizicheskikh parametrov. Sb. Nauch. trudov FEI, Obninsk*, 1996, pp. 220-223.
  5. Popov I.A., Lovyagin V.A., Sajda D.M., Matuzaev K.B. Optical measurement system of technical vision for measuring the true characteristics of a two-phase flow. Proceedings of the Second Russian National Conference on Heat Exchange, Moscow, *Izdatel'stvo MEI*, 1998, V.5, pp.79-81.
  6. Popov I.A., Lovyagin V.A., Sajda D.M., Matuzaev K.B. The vapor content of a two-phase adiabatic flow according to the results of measurements by an optical measuring system of technical vision. Proceedings of the Second Russian National Conference on Heat Exchange, Moscow, *Izdatel'stvo MEI*, 1998, V.5, pp. 82-84.
  7. Sviridenko I.P., Goryachev V.V., Pokrovskiy Ya.N. Sensors for measuring the heat dissipation profile. *Metody i sredstva izmereniya teplofizicheskikh parametrov. Sb. Nauch. trudov FEI, Obninsk*, 1996, pp. 89-97.
  8. Ostrejkovskiy V.A. *Ekspluatatsiya atomnykh stancij* [Exploitation of the atomic stations] Moscow, Energoatomizdat, 1999, 928 p.
  9. Popov I.A., Domashev E.D., Sychev E.N., Zhuravlev A.A. Experimental setup and automated system of data collection and processing for simulation of emergency thermal-hydraulic processes. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2007, Vol. 29, No 2, pp. 62-68.
  10. Nigmatulin B.I., Melihov O.I., Solov'yov S.L. The state and development of domestic system thermo-hydraulic codes for modeling emergency and non-stationary processes at nuclear power plants. *Teploenergetika*, 2001, No. 3, pp. 17-20.
  11. Popov I.A., Kachur S.A. A method for identifying the vapor content in the mixing chamber of a VVER nuclear reactor. *Sevastopol: Sb.nauch.tr. SNUYaEiP*, 2009, No 2(30), pp. 36-43.

УДК 681.518.5:543.4

## Анализ спектральных методов контроля износа деталей энергетического оборудования

Н.И. Кузнецова<sup>1</sup>, М.М. Дельцов<sup>2</sup>, Д.В. Карнаушенко<sup>3</sup>ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>nika100452@gmail.com, <sup>2</sup>scout3004@gmail.com, <sup>3</sup>daniilkerch17@gmail.com

Статья поступила 28.06.2021 г.; после доработки 30.06.2021 г.

### Аннотация

Для того, чтобы не допустить снижения безопасности и экономичности АЭС необходимо обеспечить безаварийную эксплуатацию основного оборудования станции. Для этого следует проводить его диагностирование. Одним из способов определения текущего состояния механического оборудования, а также определения остаточного ресурса может являться метод спектрального анализа масла, омывающего узлы и элементы агрегатов. В статье описана физическая основа спектрального анализа, а также описаны основные, наиболее часто используемые методы его проведения.

**Ключевые слова:** спектральный анализ, оценка, износ, диагностирование, ресурс.

## Analysis of spectral methods for monitoring the wear of parts of the power equipment

N.I. Kuznetsova<sup>1</sup>, M.M. Del'tsov<sup>2</sup>, D.V. Karnaushenko<sup>3</sup>Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, <sup>1</sup>nika100452@gmail.com, <sup>2</sup>scout3004@gmail.com, <sup>3</sup>daniilkerch17@gmail.com

Received 28.06.2021 y.; received in final form 30.06.2021 y.

### Abstract

In order to prevent a decrease in the safety and efficiency of the NPP, it is necessary to ensure the non-emergency operation of the main equipment of the plant. For this, it should be diagnosed. One of the ways to determine the current state of mechanical equipment, as well as to determine the residual resource, can be the method of spectral analysis of the oil that washes the units and elements of the units. The article describes the physical basis of spectral analysis, as well as describes the main, most frequently used methods of its implementation.

**Keywords:** Spectral analysis, estimate, deterioration, diagnosing, resource.

### Введение

Своевременное обнаружение дефектов энергетического оборудования является одной из важнейших составляющих его надежной эксплуатации. Для этого производится постоянный контроль и диагностирование его технического состояния.

Благодаря проведению технического обслуживания и диагностированию, оборудование может гораздо дольше сохранять работоспособное состояние, то есть такое состояние, при котором

оно способно выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией.

Одним из наиболее распространенных методов обнаружения дефектов в конструкции является визуальный осмотр. Однако для осмотра труднодоступных узлов и деталей необходима полная или частичная разборка узла, а иногда и разрушение детали. Для того чтобы расширить возможности контроля технического состояния узлов оборудования, различных резервуаров,

трубопроводов, необходимо использование других методов неразрушающего контроля.

Целью данной статьи, на основе информации о диагностировании основного механического оборудования на энергоблоках АЭС, является оценка эффективности метода спектрального анализа масла, омывающего узлы и механизмы агрегатов, как одного из основных методов определения текущего состояния и остаточного ресурса оборудования.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Произвести сбор и изучить информацию об используемых методах диагностирования механического оборудования на энергоблоках АЭС.
- Необходимо осветить основные используемые физические основы спектрометрии и
- Рассмотреть методы спектрального анализа и произвести их сравнительный анализ
- Обобщить результаты полученного сравнительного анализа, оценить их эффективность при диагностировании оборудования.

Одним из таких методов является метод спектрального анализа продуктов износа в масле.

### Физические основы спектрометрии

Принцип работы спектрометрии рассмотрим на примере атома натрия, атомный номер 11 [1].

На рис. 1 в упрощенном виде представлены процессы, проходящие при спектрометрии.

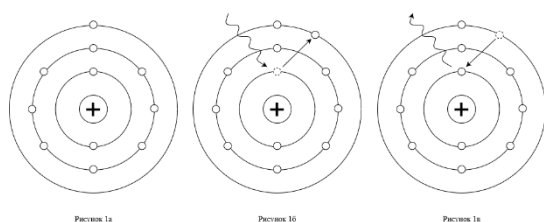


Рис. 1. Модель атома натрия

На рис. 1а представлен атом в основном невозбужденном состоянии.

В результате возбуждения, например, пламенем горелки, электрической дугой или другим способом электроны, поглощая энергию переходят в другое состояние с большей энергией.

«Возбужденные» электроны временно вытесняются от ядра атома на более высокую, нестабильную орбиту, как на рис. 1б.

Достигнув этого нестабильного состояния электрон возвращается в стабильное состояние,

высвобождая при этом энергию в виде света (рис. 1с) строго определенной длины волны, определяемой энергией электрона.

Поскольку для сложных атомов, которые имеют много электронов, возможно множество переходов с разной энергией, излучается свет с множеством разных длин волн.

Если этот свет разложить с помощью призмы, рис. 2, в результате получится линейчатый спектр.

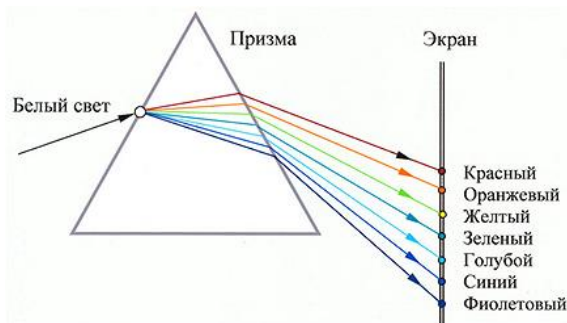


Рис. 2. Разложение света в спектр с помощью призмы

Такие спектральные линии уникальны для каждого элемента, рис. 3.

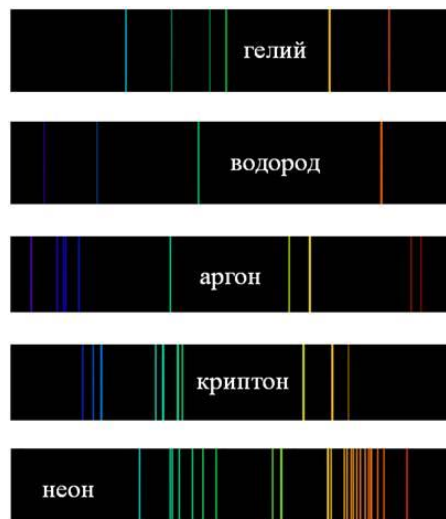


Рис. 3. Спектры некоторых элементов

Кроме видимого света атомы также могут испускать фотоны в ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах длин волн.

Чем больше атомный номер элемента, тем сложнее его спектр.

Интенсивность спектральных линий пропорциональна концентрации элемента, присутствующего в образце.

Когда в образце присутствует более одного

элемента, для каждого элемента появятся спектральные линии с явно разными длинами волн.

### Диагностирование износа деталей механизмов методом спектрального анализа

Методы спектрального анализа масел позволяют выявлять неисправности деталей и прогнозировать в ряде случаев остаточный ресурс на ранней стадии. Объектами диагностирования износов по параметрам масел являются любые детали, «омываемые» маслом [2].

В результате изнашивания узлов в масле содержатся индикаторы износа. Основными индикаторами износа являются железо (Fe)—основной элемент конструкционных материалов большинства составляющих коробок передач, медь (Cu)—основной элемент медных синхронизаторов и втулок, хром (Cr) и марганец (Mn)—основные легирующие элементы, входящие в состав конструкционных материалов коробок передач и главных передач, кремний (Si)—содержится в составе грязи и пыли и характеризует влияние условий эксплуатации [3].

Содержание указанных элементов в масле будет пропорционально скорости изнашивания сопряжений двигателя и коэффициенту пропуска пыли системой воздухоочистки. Поскольку интенсивность изнашивания зависит от режимов работы оборудования, то содержание продуктов износа в эксплуатации при удовлетворительной фильтрации воздуха и масла будет колебаться около некоторого значения, отражающего средний процесс изнашивания данного двигателя.

При возникновении в узле неисправности увеличивается скорость изнашивания его деталей и происходит увеличение концентрации продуктов износа в масле от их средних значений, характерных для исправного состояния двигателя. Таким образом, по уровню концентрации можно выявить скрытые и прогнозируемые (назревающие) отказы. Для диагностического заключения результаты определения концентрации элементов сравнивают с предельными значениями элементов.

### Анализ методов спектрального анализа

Наиболее часто используемыми методами спектрального анализа масла являются [4]:

- метод вращающегося электрода;
- рентгенофлуоресцентный анализ;
- атомно-абсорбционная спектрометрия

(ААС);

- оптико-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной (ИСП-ОЭС)

**Метод вращающегося электрода.** Источник возбуждения в современных спектрометрах, - электрический разряд. Источник предназначен для передачи образцу энергии дуги или искры. В спектрометрах для анализа масла между двумя электродами создается большой электрический потенциал. В качестве электрода используется вращающийся диск и графитовый стержень. В зазоре между электродами возникает пробой масла. Электрический заряд, накопленный конденсатором, разряжается через этот зазор, создавая высокотемпературную электрическую дугу, которая испаряет часть образца, образуя плазму. Свет, испускаемый в результате этого процесса, содержит выбросы всех элементов, присутствующих в образце. Это излучение можно разложить в спектр и измерить с помощью правильно спроектированной оптической системы. Этот метод широко применяется для анализа масла во всем мире.

К преимуществам метода относится:

1. простота;
2. надежность; работает внелабораторной среде;
3. высокая чувствительность для индикаторов износа размером менее 10 мкм.

К недостаткам относится:

1. предел обнаружения выше, чем у ААС, ИСП-ОЭС;
2. влияние матричного эффекта на некоторые смазочные материалы;
3. требуется отдельная калибровочная кривая для контроля качества смешивания;
4. неэффективен для частиц размером более 10 мкм.

**Рентгенофлуоресцентный анализ.** Источники возбуждения в данном методе являются рентгеновские лучи. Рентгеновское излучение достаточно высокой энергии выбивает электроны из внутренних оболочек атомов. Чтобы перейти на более низкий энергетический уровень, эти электроны испускают энергию в виде рентгеновских лучей. Эти испускаемые рентгеновские лучи имеют определенную энергию, типичную для анализируемого элемента. Интенсивность производимого рентгеновского излучения пропорциональна концентрации присутствующих элементов.

Для обнаружения элементов в анализе масла используются энергодисперсионные рентгеновские трубки. Одним из распространенных спосо-

бов использования этого метода является контроль качества новых масел путем проверки концентрации присадок. Для приготовления жидкой пробы сначала изготавливают приспособление для проб, используя майларовую пленку, натянутую на оба конца полиэтиленового цилиндра, с осторожностью помещая пробу масла в цилиндр до того, как верхняя крышка пленки будет зажата. Затем его помещают в камеру для образцов и облучают - время зависит от настроек и желаемой точности, обычно от 3 до 5 минут. Рентгенофлуоресцентный анализ схож с атомной спектрометрией при высоких концентрациях присадок, но спектроскопия остается доминирующим выбором, когда используются металлы со следами износа, которые остаются взвешенными в масле.

К преимуществам метода относятся:

1. минимальная подготовка проб;
2. позволяет анализировать крупные продукты износа;
3. широкий динамический диапазон для элементов с высокой концентрацией, таких как присадки;
4. Простота использования.

К недостаткам относятся:

1. неудовлетворительные пределы обнаружения для некоторых ключевых элементов, таких как кремний и бор;
2. время испытания несколько минут;
3. персонал должен обладать определёнными навыками.

**Атомно-абсорбционная спектрометрия (ААС).** Атомно-абсорбционный спектрометр - это недорогой спектрометр с превосходной чувствительностью, который часто используется, когда необходимо контролировать только несколько элементов. Этот метод основан на атомном поглощении, при котором атом будет поглощать свет именно на тех длинах волн, на которых он бы излучал свет при возбуждении. Образец масла готовят путем разбавления растворителем, этот образец распыляют с помощью распылителя и вводят в пламя кислород-ацетиленовой горелки. Источник излучения, например, электронно-лучевая трубка, обеспечивает свет, типичный для интересующего элемента (ов), и свет направляется через пламя к детектору. Если ни один из элементов не присутствует в образце, количество света, проходящего через пламя и измеряемого детектором, является максимальным. По мере увеличения концентрации интересующего элемента (из пробы масла) происходит абсорбция света, и сигнал детектора уменьшается.

Такие спектрометры способны хорошо выполнять анализ конкретных индикаторов износа в пробах масла, но они редко используются для мониторинга состояния, поскольку измеряют только один элемент за одно измерение. Для измерения следующего элемента требуется заменить используемую лампу и повторить процесс измерения.

**Оптико-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-ОЭС).** Типичный ИСП-ОЭС-прибор состоит из двух частей: плазменной горелки, в которой осуществляется возбуждение атомов образца и оптического спектрометра, улавливающего, разделяющего и анализирующего поступающее из плазмы излучение [5].

Плазменная горелка состоит из трех концентрических кварцевых трубок. Вокруг этих трубок размещают обмотки волновода, на который подается переменный ток с частотой, соответствующей радиочастотной электромагнитной области. Этот ток, проходя через обмотки, создает мощное электромагнитное поле, с помощью которого и поддерживается, и управляется плазма.

С помощью насоса образец, который необходимо проанализировать, в форме раствора попадает в распылитель, который переводит пробу в форму аэрозоля и подает непосредственно в аргонную плазму.

После этого и происходит атомизация и возбуждение исследуемых элементов, излучение которых улавливает оптика прибора. Излучение из факела собирается и фокусируется, после чего попадает на полихроматор, который обычно представляет собой дифракционную решетку и служит для разделения света по длинам волн.

Разделенный свет попадает в детектор, сигнал от которого усиливается и обрабатывается прибором или подключенным к нему компьютером. Современные программные пакеты для ИСП-ОЭС-спектрометрии позволяют не только определить качественный и количественный состав образца по поступившему сигналу, но и учесть при расчетах перекрывания отдельных линий и искажающие сигнал эффекты матрицы.

К преимуществам метода относятся:

1. более низкие пределы измерения;
2. сниженный матричный эффект;
3. высокая точность и прецизионность;
4. высокая производительность и степень автоматизации.

К недостаткам относятся:

1. требуется использования специальных газов;
2. требуется проведение пробоподготовки;
3. анализ возможен только в лабораторной среде;
4. более сложный в эксплуатации;
5. неэффективен для частиц размером более 5 мкм.

### Заключение

Подводя итог, нужно отметить, что существует множество подходов к измерению содержания индикаторов износа в масле, каждый из них обладает своими преимуществами и недостатками. Выбор того или иного метода зависит от требуемой точности, состава определяемых компонентов, объема образцов и доступных ресурсов. Спектрометрический анализ масла применим к любой системе смазки с замкнутым контуром, например, в дизельных и бензиновых двигателях, газовых турбинах, трансмиссии, коробки передач, компрессоры и гидравлические системы. В соответствии с надлежащей практикой с контролируемого оборудования периодически берутся пробы масла. Выбранный спектрометр должен быть в состоянии анализировать образец на следовые уровни металла, изношенного от движущихся частей, а также на уровни посторонних загрязнений и добавочных элементов. Полученные данные при сравнении с предыдущими анализами и допустимыми пределами могут указывать на исправный механизм, показывающий только нормальный износ, или могут указывать на потенциально серьезную проблему на ее ранних стадиях.

Несмотря на то, что спектральный анализ масла, в основном, используется для диагностирования двигателей тепловозов, авиационных двигателей, коробок передач и трансмиссий, с его помощью можно исследовать узлы, омываемые маслом любого оборудования, такого как подшипники турбин или насосов.

С учетом вышесказанного такой метод диагностики может стать серьезным инструментом диагностирования.

### Список литературы

1. Spectroscopy Oil Analysis [Электронный ресурс] URL: <https://www.synlube.com/Spectroscopy.htm>. (дата обращения 20.06.2021)
2. Мигаль, В.Д. Методы технической диагностики автомобилей: учебное пособие для вузов / В.Д.

Мигаль, В.П. Мигаль – Москва: ФОРУМ ИНФРА-М, 2014 – 416 с.

3. Скрипка, А.В. Диагностирование дизелей пожарной техники по соотношению концентраций продуктов изнашивания в моторном масле. / А.В. Скрипка // Вестн. Воронеж. ин-та ГПС МЧС России. – 2017. – №4 – С. 56-59.
4. A Guide to Spectroscopy for Used Oil Analysis [Электронный ресурс] URL: <https://www.spectrosci.com/resource-center/lubrication-analysis/literature/e-guides/guide-to-spectroscopy-in-used-oil-analysis>. (дата обращения 20.06.2021)
5. Оптико-эмиссионная спектрометрия с индуктивно-связанной плазмой [Электронный ресурс] URL: <https://avanta.by/index.pl?act=NEWSSHOW&id=2014102701#>. (дата обращения 20.06.2021)

### References

1. Spectroscopy Oil Analysis [Electronic resource] URL: <https://www.synlube.com/Spectroscopy.htm>. (accessed 20.06.2021)
2. Migal', V.D. Metody tekhnicheskoy diagnostiki avtomobilej [Methods of technical diagnostics of cars] – Moscow: INFRA-M FORUM, 2014 – 416 p.
3. Skripka, A.V. Diagnostirovanie dizelej po-zharnoj tekhniki po sootnosheniyu koncentracij produktov iznashivaniya v motornom masle [Diagnostics of diesel engines of fire equipment by the ratio of the concentrations of wear products in the engine oil] // Bulletin of the Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia – 2017. – №4 – p. 56-59.
4. Guide to Spectroscopy for Used Oil Analysis [Electronic resource] URL: <https://www.spectrosci.com/resource-center/lubrication-analysis/literature/e-guides/guide-to-spectroscopy-in-used-oil-analysis>. (accessed 20.06.2021)

---

**НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ**

---

УДК 620.92

**Возможности аккумулирования электрической энергии**В.М. Зайченко<sup>1</sup>, В.В. Кувшинов<sup>2</sup>, А.К. Сухенко<sup>3</sup>, Д.Ф. Бордан<sup>4</sup>, И.Г. Жиганов<sup>5</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>zaitch@oivtran.ru, <sup>2</sup>VVKuvshinov@sevsu.ru, <sup>3</sup>suhojdj@gmail.com,  
<sup>4</sup>bordan79@mail.ru, <sup>5</sup>zhiganov80@gmail.com

Статья поступила 06.09.2021 г.; после доработки 08.09.2021 г.

**Аннотация**

В работе рассматриваются возможные способы аккумулирования электроэнергии. Произведено сравнение способов. Оценивается их направление и потенциал применительно для России. Рассмотрены различные проекты по аккумулированию электроэнергии. Предложена схема коммерциализации.

**Ключевые слова:** альтернативные источники, аккумулирование электроэнергии, водородная энергетика.

**Possibilities for storing electrical energy**V.M. Zaichenko<sup>1</sup>, V.V. Kuvshinov<sup>2</sup>, A.K. Sukhenko<sup>3</sup>, D.F. Bordan<sup>4</sup>, I.G. Jiganov<sup>5</sup>

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
<sup>1</sup>ivantyeyev@gmail.com, <sup>2</sup>shaytor1950@mail.ru, <sup>3</sup>kuvshinov.vladimir@gmail.com, <sup>4</sup>oma091041@gmail.com,  
<sup>5</sup>bo\_zemlya\_zdoroviya@mail.ru

Received 06.09.2021 y.; received in final form 08.09.2021 y.

**Abstract**

The paper considers possible ways of accumulating electricity. Comparison of methods is made. Their direction and potential as applied to Russia is assessed. Various projects for energy storage were considered. A commercialization scheme is proposed.

**Keywords:** alternative sources, energy storage, hydrogen energy.

**Введение**

В последние годы большое распространение в мире получают солнечные и ветровые электроустановки (СЭУ и ВЭУ). И в России начинается активное сооружение солнечных электростанций (СЭС) и ветроэлектрических станций (ВЭС). При их эксплуатации остро стоят вопросы аккумулирования электрической энергии для обеспечения, независимо от климата-агинометрических условий, гарантированного энергоснабжения потребителей.

Применение систем аккумулирования с использованием обычных электрохимических аккумуляторов (ЭХА) при мощностях СЭУ и ВЭУ

порядка 100 и более киловатт является малопримлемым [1,2].

**Системы аккумулирования**

Наиболее эффективными для аккумулирования больших количеств электроэнергии считают создание гидроаккумулирующих и воздухоаккумулирующих систем (рис.1 и 2). Но для создания ГАЭС и ВАЭС необходимы определенные особенности геологического строения площадки, что не всегда имеет место там, где сооружается СЭС или ВЭС. Поэтому для систем с ВИЭ часто прибегают к другим способам акку-

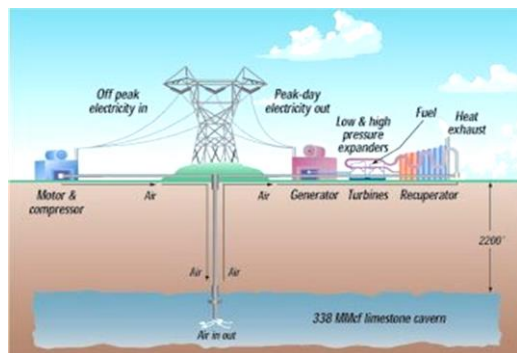
мулирования, позволяющим создавать накопители электроэнергии большой емкости [3,4].



**Рис. 1** Гидроаккумулирующая электростанция под г. Каунас, Литва на реке Нямунас. Верхний водоем сделан искусственно.

Для этих целей используют:

- новые электрохимические аккумуляторы большой энергии;
- молекулярные конденсаторы (суперконденсаторы);
- сверхпроводящие индуктивные накопители (СПИН);
- электромашинные накопители с супермаховиками;
- гравитационные, пружинные и т.п. накопители энергии;
- системы с водородным аккумулярованием.



**Рис. 2** Схема ВАЭС

Внешний вид наиболее распространенных типов электрохимических накопителей большой емкости представлен на рис.3...5. На рис.7 приведен компьютерный макет станции накопления электроэнергии мощностью 50 МВт с использованием цинк-воздушных аккумуляторов.

**Супермаховики** изготавливаются из сверхпрочного углеродного волокна, получаемого на основе нанотехнологий, и имеет удельную энергоемкость 5...15 МДж/кг или 1,4...4,2 кВтч/кг, что недостижимо для таких накопителей как

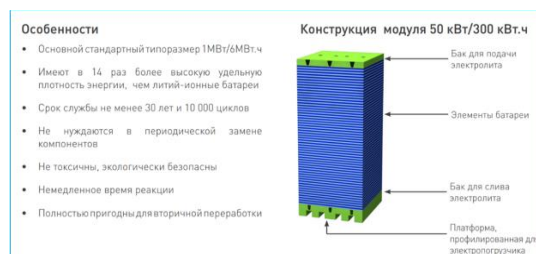
электрохимические аккумуляторы, конденсаторы, пружины.



**Рис. 3** Натрий-серные (NaS) накопители энергии компании NGK, Япония



**Рис. 4** Редокс-ванадиевые накопители энергии с проточным электролитом (Vanadium Flow Battery)



**Рис. 5** Основные параметры и внешний вид цинк-воздушных накопителей



**Рис. 6** Станция аккумулярования электроэнергии мощностью 50/300 МВт\*ч с использованием цинк-воздушных накопителей

**Суперконденсаторы** (молекулярные конденсаторы, ионисторы) последних разработок

имеют электрические емкости до нескольких десятков Фарад и могут накапливать электроэнергию до нескольких ТДж/м<sup>3</sup>. Число циклов заряда-разряда для них практически неограниченно. Недостатком является саморазряд, ограничивающий время хранения энергии от нескольких часов до нескольких тысяч часов. Интенсивные работы, проводимые сегодня в мире по усовершенствованию супер конденсаторов, еще не привели к созданию серийного их производства с приемлемой удельной стоимостью.



**Рис. 7** Накопитель мощностью 20 МВт в г. Стефентаун, штат Нью-Йорк, США на маховиках фирмы BeaconPower.

**Сверхпроводящие индуктивные накопители (СПИН)** представляют собой, по сути, катушки из сверхпроводника. Поскольку эффект сверхпроводимости заключается в полном исчезновении электрического сопротивления проводника при охлаждении его ниже некой критической, обычно глубоко отрицательной, температуры, то пропадают и все потери энергии, связанные с электрическим сопротивлением. Подобное устройство может хранить энергию сколь угодно долго в виде энергии магнитного поля, создаваемого с помощью сверхпроводящего соленоида. Очевидно, что при длительном использовании такого аккумулятора понадобятся дополнительные расходы на охлаждение, однако выгода от использования в итоге с избытком покрывает эти расходы.

Особенно эффективным применение СПИН станет после завершения работ по созданию высокотемпературных сверхпроводников.

### **Аккумулирование с использованием водородных технологий**

Наиболее привлекательным и перспективным направлением в области аккумулирования энергии считают использование водородных технологий. Сегодня в этом направлении сконцентрированы исследования в США, Японии,

Европейских странах. В России такие исследования ведут Объединенный институт высоких температур Российской академии наук» (ОИВТ РАН), Москва, Научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт «РОСТОВТЕПЛОЭЛЕКТРОПРОЕКТ» (РоТЭП), Ростов-на-Дону и компания «АЛЪЯНС-ВИЭ», Ростов-на-Дону.

Преимущества накопления энергии с помощью хранения водорода показывает сравнение удельной запасаемой энергии, например, в кислотных аккумуляторах (0,1-0,2 МДж/кг) и в баллонах со сжатым до 200 атм водородом (1,4 МДж/кг). Системы хранения водорода в металлгидридах (например, в лантаноидах никеля – NiLa5) еще эффективнее (2-10 МДж/кг).

Применение водорода решает проблемы широкомасштабного освоения энергетики на базе возобновляемых источников энергии: солнечной, ветровой, гидравлической. В моменты образования излишних количеств электроэнергии на станциях с использованием ВИЭ обеспечивается получение и накопление водорода на электролизных установках. Затем накопленный водород в нужные моменты времени используют для получения электрической и тепловой энергии.

Получение водорода с помощью электролиза хорошо освоено. Сегодня серийно выпускаются надежные и экономичные как отечественные, так и зарубежные электролизеры большой производительности (см. рис.8 и 9).



**Рис. 8** Электролизер ФВ-500 М производства ОАО «Уралхиммаш» производительностью 536 м<sup>3</sup>/ч водорода с чистотой 99,5 % при давлении 0,01 МПа.

Использование водорода для получения электрической энергии может осуществляться различными путями. В простейшем случае водород можно сжигать на тепловых электростанциях для получения электроэнергии с помощью паротурбинных, газотурбинных или парогазовых технологий. Для малых электростанций (0,2...10

МВт) необходима разработка газопоршневых двигателей, использующих водород в виде топлива. Во многих западных странах проводятся исследования по использованию для целей водородной энергетики электрохимических генераторов на топливных элементах. Существуют планы постройки в Европе установки на топливных элементах мощностью 200 МВт на базе электролизного завода Botlek.



**Рис. 9** Электролизер компании NORSK, Норвегия производительностью 125 м<sup>3</sup>/ч водорода с чистотой 99,5 % при давлении 1,0 МПа.

Начато также проведение в жизнь перехода на водородную энергетику Исландии – острова с большим потенциалом возобновляемых источников энергии. За 15 лет планируется заменить органическое топливо в стране на водород поэтапно:

- перевод на водород автотранспорта,
- освоение водорода как топлива,
- перевод на водородное топливо флота,
- торговля водородом.

Европейское Сообщество финансирует «водородный проект» Исландии. Выделено 2,8 млн Евро из требуемых 7 млн на создание первой заправочной водородной станции для транспорта в Рейкьявике. Автобусы, работающие на водороде, поставит компания Daimler/Chrysler. Такие автобусы Mercedes-Benz Citaro с двигателем 205 кВт и питанием от топливных элементов опробуются в Гамбурге, Штуттгарте, Мадриде. Баллоны с водородом под давлением 250 бар размещены на крыше, скорость автобуса — 80 км/ч, дальность поездки — до 200 км.

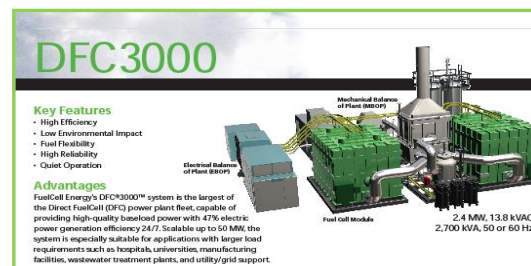
Испытывается модель автомашины, разработанной компаниями Opel и General Motors, которые планируют организовать серийный выпуск к 2016 г. миллиона машин в год, работающих на водороде.

В Германии – стране с наибольшим вводом

ветроэлектрических и солнечных электростанций, создание накопителей на водороде считают необходимым для решения проблем работы систем с ВИЭ на общую сеть. Использование ГАЭС для выравнивания выдачи электроэнергии в сеть считают в Германии нереальным из-за отсутствия подходящих для них мест размещения.

Фирма SIEMENS в Германии сегодня демонстрирует серийные генераторы типа SFC-200 SOFC мощностью 200 кВт на топливных элементах, фирма FuelCellEnergy (США) – установки DFC-3000 мощностью 3000 кВт (рис.10).

Россия существенно отстает от Запада в вопросах применения водородных технологий для аккумулирования электрической энергии. Для развития этого направления необходимы инвестиции – для начала, для выполнения НИОКР – хотя бы в объеме 5 - 7 % от тех средств, которые расходуются за рубежом.



**Рис. 10** Серийные электрохимические генераторы на топливных элементах.

## Заключение

В табл.1 представлены сравнительные характеристики всех рассмотренных выше накопителей энергии с различными технологиями. Как видно из данных этой таблицы, накопители энергии с использованием водородных технологий имеют существенные преимущества над остальными почти по всем параметрам. Поэтому целесообразным является преимущественное развитие именно водородных накопителей.

Сегодня в России ведется строительство крупных солнечных электростанций на Алтае, в Астраханской области, в Крыму, в Тюменской области, на Дальнем Востоке, в Дагестане, в Краснодарском крае, в Ставропольском крае (рис.11). Планируется сооружение крупных ВЭС в Краснодарском крае: на Таманском полуострове (рис.12), на Ейской площадке, на горном плато между Геленджиком и Кабардинкой, в пригородах Анапы и др., в Астраханской области – под г. Нариманов, в Ростовской области –

на пяти площадках (на восточной окраине Ростова-на-Дону, у пос. Маргаритово, под Таганрогом и др.). Действует целая группа крупных ВЭС в Крыму. Ряд ветростанций намечается к сооружению на побережье Северного Ледовитого океана, на о. Сахалин, на Камчатке. На всех этих объектах требуется создание эффективных аккумулирующих систем и, при мощностях в диапазоне 50...600 МВт, предпочтительным несомненно будет применение водородного аккумулирования.

Сегодня водородное аккумулирование – первостепенная задача, определяющая, по сути, все развитие возобновляемой энергетики.

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики накопителей энергии

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАССМОТРЕННЫХ  
НАКОПИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

| №<br>№ | Тип                              | Мощность<br>или<br>энергия        | КПД,<br>% | Удельная<br>энергос-<br>емкость,<br>Дж/м <sup>3</sup> | Время, с                         |               |
|--------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------|-------------------------------------------------------|----------------------------------|---------------|
|        |                                  |                                   |           |                                                       | разряда                          | хранения      |
| 1      | ГАЭС                             | 200-400<br>МВт                    | 65-<br>75 | 10 <sup>3</sup>                                       | 10-10 <sup>4</sup>               | неограниченно |
| 2      | ВАЭС                             | 200-<br>1000<br>МВт               | 70        | 10 <sup>6</sup>                                       | 10-10 <sup>5</sup>               | неограниченно |
| 3      | Тепловой                         | 50-200<br>МВт                     | 65-<br>75 | -                                                     | -                                | ограничено    |
| 4      | Химический                       | 20-50<br>МВтч                     | 60-<br>80 | -                                                     | -                                | ограничено    |
| 5      | Механический –<br>супермаховики  | 10-50<br>МВтч                     | 70-<br>85 | 10 <sup>6</sup>                                       | 10 <sup>2</sup> -10 <sup>1</sup> | ограничено    |
| 6      | Емкостный -<br>суперконденсаторы | 1-1000<br>МВтч<br>0,1-1000<br>МВт | 85        | 10 <sup>6</sup>                                       | 10 <sup>3</sup> -10 <sup>2</sup> | ограничено    |
| 7      | Индуктивный -<br>СПИН            | 4000<br>МВтч                      | 75-<br>90 | 10 <sup>6</sup>                                       | 10 <sup>4</sup> -10 <sup>4</sup> | ограничено    |
| 8      | Водородный                       | 20-5000<br>МВт                    | 20-<br>40 | 10 <sup>7</sup>                                       | 10 <sup>4</sup> -10 <sup>4</sup> | неограниченно |

Помимо крупных электростанций в настоящее время в РФ создается множество автономных энергоустановок малой мощности (100 – 1000 кВт) с использованием энергии солнца и ветра. К ним относятся СЭУ и ВЭУ для отдельных промышленных предприятий (ООО «ЕвроХим-БМУ» – рис.13, ЗАО «Агрокомплекс», ОАО «Порт Кавказ», ЗАО «Сырзавод «Тихорецкий» ООО «Мясокомбинат» в Тихорецке Краснодарского края; ОАО «Монтажавтоматика» в Ростове-на-Дону, ЗАО «Рыбозавод» в г.Пролетарске и очистные сооружения в г.Донецке Ростовской области, ЗАО «Ключищенская кера-

мика» в Республике Татарстан», другие предприятия в Архангельской, Мурманской, Тамбовской, Тюменской областях). Здесь перечислены только предприятия, для которых разработку и внедрение ведут институт «Ростовтеплоэлектропроект» и ООО «Альянс-ВИЭ». В России же еще множество малых СЭУ и ВЭУ возводится другими компаниями. И все эти установки пока оснащаются дорогостоящими и малоэффективными аккумуляторными системами на базе обычных электрохимических аккумуляторов. В этих случаях также настоятельно требуется применение эффективного водородного аккумулирования.



**Рис. 11** Проект Кисловодской солнечной электростанции мощностью 120 МВт, Ставропольский край (институт «Ростовтеплоэлектропроект»).



**Рис. 12** Проект ветроэлектрической станции мощностью 90 МВт в Темрюкском районе (Таманский полуостров) Краснодарского края (Институт «Ростовтеплоэлектропроект»)

Из приведенных выше перечней строящихся и планируемых к сооружению энергетических объектов на базе ВИЭ видно, насколько обширна возможная область практического применения систем водородного аккумулирования в России. В то же время на энергетическом рынке РФ сегодня нет никаких предложений в этой сфере. Поэтому задачи развертывания НИОКР с

последующей коммерциализацией научных разработок требуют незамедлительного решения.



**Рис. 13** Фотоэлектрическая солнечная установка на очистных сооружениях ООО «ЕвроХим-БМУ» в г.Белореченске Краснодарского края (проект института «Ростовтеплоэлектропроект»)

### Выводы

При осуществлении представленных проектов возможна следующая схема их коммерциализации.

1. Выполнение в 2015...2016 гг. НИОКР с отработкой и патентованием новых технических решений для практического применения. Исполнители – ОИВТ РАН и РоТЭП.

2. Сооружение в 2016 г. экспериментально-промышленной установки по результатам выполненной НИОКР. Исполнитель – ООО «Альянс-ВИЭ», Ростов-на-Дону, выполняющее функции индустриального партнера с вложением доли собственных инвестиций в строительство.

3. Проведение испытаний и отработка в 2016...2017 гг. оптимальных режимов работы на экспериментально-промышленной установке. Исполнитель – ОИВТ РАН.

4. Корректировка в 2017 г. проектно-технической документации установки по результатам испытаний и отработки режимов работы. Исполнитель – РоТЭП.

5. Сооружение с 2018 г. серийных установок на базе ВИЭ с водородным аккумулярованием для нужд промышленных предприятий РФ и СНГ. Исполнитель – ООО «АЛЪЯНС-ВИЭ».

### Список литературы

1. Абдали Л.М.А., Аль-Руфай Ф.М., Якимович Б.А., Кувшинов В.В. Оптимизация аккумулярования энергии в гибридных системах ветроэнергетики и фотовольтаики. Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. 2020. Т. 23. № 2. С. 100-108.
2. Туленков С.С., Кочетов И.А., Тунда В.А., Кувшинов В.В., Пивень Ю.Я. Оценка состояния и

перспективы развития солнечной энергетики в республике Крым. Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 3. С. 76-81.

3. Зайченко В.М., Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. Направления развития энергетики. Энергетические установки и технологии. 2019. Т. 5. № 3. С. 53-61.
4. Кувшинов В.В., Смирнов В.В., Коломийченко В.П., Чунин Д.В., Вазенин А.А. Системы аккумулярования для солнечных установок. В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018. сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. 2018. С. 648-653.

### References

1. Abdali L.M.A., Al-Rufai F.M., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V. Optimization of energy storage in hybrid wind and photovoltaic systems. Bulletin of ISTU named after M.T. Kalashnikov. 2020.Vol. 23.No. 2.P. 100-108.
2. Tulenkov S.S., Kochetov I.A., Tunda V.A., Kuvshinov V.V., Piven 'Yu.Ya. Assessment of the state and prospects for the development of solar energy in the Republic of Crimea. Power plants and technologies. 2020.Vol. 6.No. 3.P. 76-81.
3. Zaichenko V.M., Chernyavsky A.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Abeidulin S.A. Directions of energy development. Power plants and technologies. 2019.Vol. 5.No. 3.P. 53-61.
4. Kuvshinov V.V., Smirnov V.V., Kolomiychenko V.P., Chunin D.V., Vazhenin A.A. Storage systems for solar installations. In the collection: Environmental, Industrial and Energy Safety - 2018.collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference. ed. L. I. Lukina, N. A. Bezgina, N. V. Lyamina. 2018.S. 648-653

УДК 620.92

## Методы тестирования наземных фотоэлектрических модулей

А.К. Сухенко<sup>1</sup>, Б.А. Якимович<sup>2</sup>, В.В. Кувшинов<sup>3</sup>, Д.Ф. Бордан<sup>4</sup>, Р.А. Нашев<sup>5</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,

г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>suhoydj@gmail.com, <sup>2</sup>BAYakimovich@sevsu.ru, <sup>3</sup>VVKuvshinov@sevsu.ru,<sup>4</sup>bordan79@mail.ru, <sup>5</sup>bo\_zemlya\_zdoroviya@mail.ru

Статья поступила 30.08.2021 г.; после доработки 01.09.2021 г.

### Аннотация

Для качественного производства большого количества фотоэлектрических преобразователей необходимо иметь достоверные результаты их технических, электрических и энергетических характеристик. Для этого в предлагаемой работе были произведены испытания их рабочих характеристик, исследования качества контактной сетки, измерение температурных коэффициентов, измерения номинальной рабочей температуры солнечной кремниевой ячейки различными методами.

**Ключевые слова:** альтернативные источники, солнечные элементы, кремниевые фотоэлектрические преобразователи, солнечная радиация, фотоэлектрические модули

## Methods for testing ground photoelectric modules

A.K. Sukhenko<sup>1</sup>, B.A. Yakimovich<sup>2</sup>, V.V. Kuvshinov<sup>3</sup>, D.F. Bordan<sup>4</sup>, R.A. Nashev<sup>5</sup>Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, <sup>1</sup>suhoydj@gmail.com, <sup>2</sup>BAYakimovich@sevsu.ru, <sup>3</sup>VVKuvshinov@sevsu.ru, <sup>4</sup>bordan79@mail.ru, <sup>5</sup>bo\_zemlya\_zdoroviya@mail.ru

Received 30.08.2021 y.; received in final form 01.09.2021 y.

### Abstract

For the high-quality production of a large number of photovoltaic converters, it is necessary to have reliable results of their technical, electrical and energy characteristics. For this, in the proposed work, their performance was tested, the quality of the contact grid was studied, the temperature coefficients were measured, and the nominal operating temperature of a solar silicon cell was measured by various methods.

**Key words:** alternative sources, solar cells, silicon photovoltaic converters, solar radiation, photovoltaic modules

### Введение

Предложенные международные стандарты устанавливают требования Международной электротехнической комиссии (IEC) для определения качества конструкции фотоэлектрических преобразователей и модулей, а также определенные требования к испытаниям на соответствие техническим условиям наземных фотоэлектрических модулей, пригодных для длительной эксплуатации в обычном климате под открытым небом.

Этот стандарт применяется только к модулям, в которых используется кристаллический кремний [1,2]. Стандарты на тонкопленочные

модули и для использования в других условиях окружающей среды, таких как морской или экваториальный климат, находятся в разработке.

Данный стандарт не применяется к модулям, которые используются с концентраторами.

Целью ряда испытаний является определение электрических и тепловых характеристик модулей и возможность показать, насколько это возможно в рамках приемлемых ограничений стоимости и времени, что модуль в состоянии выдержать длительную эксплуатацию под открытым небом в условиях вышеописанного климата [3-7]. Реальный ожидаемый срок службы, таким образом квалифицируемых модулей будет

зависеть от их конструкции, условий окружающей среды и условий, при которых эксплуатируются модули [2].

### Отбор образцов для тестирования

Для квалификационных испытаний произвольно отбирается восемь модулей (плюс резервные по желанию) из серийной партии или партий в соответствии с правилами IEC 410. Модули должны быть изготовлены из специальных материалов и частей согласно соответствующим чертежам и операционным картам и должны пройти обычную техническую проверку изготовителем, контроль качества и приемку продукции.

Модули должны быть полностью укомплектованы и иметь инструкции изготовителя по сборке, монтажу и подсоединению, включая максимальное допустимое напряжение [1-5].

Если предназначенные для испытания модули являются прототипами новой конструкции, и не серийного производства, то данный факт должен быть указан в протоколе испытаний.

### Критерии успешного прохождения испытаний

Конструкция модуля считается прошедшей квалификационные испытания и, таким образом, испытания на соответствие техническим условиям IEC, если каждый испытательный образец отвечает следующим критериям:

- снижение максимальной выходной мощности при стандартных условиях испытания (STC) не превышает предписанных пределов после каждого испытания, и 8% между отдельными (параллельными) результатами;
- ни в одном образце во время испытаний не было выявлено размыкания цепи или короткого замыкания на землю;
- браковочных дефектов визуально не должно быть обнаружено;
- после проведения испытаний удовлетворяются требования к испытанию на устойчивость изоляции.

Если два или более параметров не отвечают данным критериям испытаний, то считается, что конструкция не удовлетворяет квалификационным требованиям.

Если один модуль не проходит любое из испытаний, то другие два модуля, отвечающие требованиям пункта 3, должны быть подвергнуты всему комплексу испытаний с самого начала.

Если один или оба этих модуля также не пройдут испытания, то считается, что конструкция не отвечает квалификационным требованиям. Однако, если оба модуля успешно проходят комплекс испытаний, то считается, что конструкция прошла квалификационные испытания.

### Методика проведения испытаний

*Рабочие характеристики при стандартных условиях испытания STC*

Цель работы – определить, как электрические характеристики модуля изменяются в зависимости от нагрузки при стандартных условиях испытания STC (температура фотоэлемента:  $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , освещенность:  $1000\text{Wm}^2$ ), с использованием естественного солнечного света или имитатора класса А, соответствующего требованиям.

Порядок проведения:

Определение вольтамперных характеристик модуля при стандартных условиях испытания STC. При необходимости проведение корректировки температуры и освещенности.

*Испытание качества изоляции*

Определить, хорошо ли произведена изоляция между передающими электрический ток деталями и корпусом.

Условия испытания:

Испытание должно проводиться при температуре окружающей среды и при относительной влажности, не превышающей 75%.

Порядок проведения:

1. Соедините закороченные выводы модуля и положительный вывод прибора постоянного тока для измерения сопротивления изоляции с ограничением тока.
2. Соедините открытые металлические части корпуса модуля и отрицательный вывод испытательного прибора. Если модуль не имеет рамы или рама является плохим электрическим проводником, то установите модуль на металлической опорной конструкции, которая должна быть связана с отрицательным выводом испытательного прибора.
3. Увеличьте напряжение, подводимое испытательным прибором при скорости, не превышающей 500 В/с, до максимума 1000 В плюс двойное максимальное напряжение системы (т.е. напряжение при разомкнутом контуре системы при стандартных условиях испытания STC). Удерживайте напряжение на этом уровне в течение 1 минуты. Если максимальное напряжение системы не пре-

вышает 50 V, то применяемое испытательное напряжение должно быть 500 В.

4. Уменьшите испытательное напряжение до нуля и закоротите выводы испытательного прибора на 5 минут, не отсоединяя от модуля.
5. Прекратите короткое замыкание.
6. Подведите к модулю напряжение постоянного тока не менее 500 В, испытательный прибор подсоединен в соответствии с шагами 1) и 2).
7. Измерьте сопротивление изоляции.

Требования к испытанию

При выполнении шага в) не должно быть пробоя диэлектрика (менее чем 50 мкА), и растрескивания поверхности.

Сопротивление изоляции должно быть не менее 50 МОм.

*Измерение температурных коэффициентов*

Цель: определить температурные коэффициенты тока ( $\alpha$ ) и напряжения ( $\beta$ ) на основании измерений характеристик модуля. Определенные таким образом коэффициенты являются действительными для освещенности, при которой производились измерения.

В случае с линейными модулями данные коэффициенты являются действительными в диапазоне освещенности  $\pm 30\%$  от данного уровня. Данная технология дополняет метод измерения указанных коэффициентов для отдельных фотоэлементов.

Оборудование

- Солнечный имитатор (класс В или выше). Предназначен для измерения энергетической освещенности, тока короткого замыкания и напряжения холостого тока. Предпочтительнее использовать импульсный имитатор Солнца, так как он создает небольшое количество дополнительного тепла, которое может повлиять на модуль во время проведения измерения. Если используется стационарный имитатор, то он должен быть оснащен затвором или аналогичным средством, чтобы минимизировать период интенсивности падающего излучения до 0,5 с или меньше.
- Средства для измерения температуры поверхности фотоэлемента модуля с точностью до  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ .
- Камера по размерам достаточная вместить для размещения модуля, оборудованная прозрачным окошком и средствами для равномерного нагрева и охлаждения содержи-

мого в необходимом для испытаний интервале температур.

Порядок проведения

- a) Измерьте ток короткого замыкания модуля при необходимой интенсивности освещенности при комнатной температуре.
- b) Установите тестируемый модуль в камере, а датчик контроля освещенности за камерой в плоскости модуля, но в пределах излучения имитатора. Соедините с измерительной аппаратурой.
- c) Закройте камеру и установите уровень световой освещенности такой, чтобы тестируемый модуль производил ток короткого замыкания, определенный в п. а). Используйте устройство контроля освещенности для поддержания постоянного уровня освещенности в течение всего испытания.
- d) Нагрейте модуль до максимально необходимой температуры испытания, выключите нагреватель и позвольте модулю охладиться равномерно.
- e) В течение времени охлаждения модуля измеряйте ток короткого замыкания и напряжение холостого хода через каждые 5 градусов в тестируемом диапазоне, но не менее чем в интервале  $30^\circ\text{C}$ . Полные вольтамперные характеристики можно измерить при каждой температуре для определения поправочного коэффициента кривой К.
- f) Нанесите значения  $I_{sc}$  (ток короткого замыкания) и  $V_{oc}$  (напряжение холостого хода в зависимости от температуры) и постройте по методу наименьших квадратов кривую по каждой серии данных.
- g) По кривым тока и напряжения в точке, посередине между максимальной и минимальной температурами тестируемого интервала рассчитайте температурные коэффициенты модуля  $\alpha$  и  $\beta$ .

*Измерение номинальной рабочей температуры фотоячейки (NOCT)*

Цель: определить номинал рабочей температуры фотоячейки модуля NOCT.

Номинальная рабочая температура фотоячейки NOCT определяется как равновесная средняя температура солнечного фотоэлемента в пределах площади модуля, установленного на открытом стенде, при следующих стандартных эталонных условиях окружающей среды (SRE).

Угол наклона: наклон модуля, перпендикулярный в направлении к солнцу в солнечный полдень в данной местности

- Общая световая освещенность:  $800 \text{ Wm}^2$
- Окружающая температура:  $20^\circ\text{C}$
- Скорость ветра:  $1 \text{ м/с}$
- Электрическая нагрузка: нулевая (разомкнутый контур).

Разработчик системы может использовать

номинальную рабочую температуру фотоэлемента NOCT как основу для температуры, при которой будет работать модуль, а также она является полезным параметром при сравнении характеристик модулей различной конструкции. Однако, на фактическую рабочую температуру в любое определенное время влияет конструкция монтажа, световая освещенность, скорость ветра, температура окружающей среды, температура неба, отражение и излучение от земли и близстоящих объектов. Для точного прогнозирования эксплуатационных характеристик, эти факторы должны быть приняты во внимание.

Описываются два метода определения номинальной рабочей температуры фотоэлемента NOCT.

Первый, называемый «первичным методом», универсально применим ко всем фотоэлектрическим модулям. В случае, если модуль не предназначен для установки на открытом стенде, то первичный метод может использоваться для определения равновесной средней температуры перехода солнечного фотоэлемента при стандартных эталонных условиях окружающей среды (SRE) с модулем, установленным как рекомендовано изготовителем.

Второй, называемый «методом пластины сравнения», является более быстрым, но он применяется только к таким фотоэлектрическим модулям, которые реагируют на изменения температуры окружающей среды (в пределах ограниченного диапазона скорости ветра и световой освещенности) таким же образом, как и используемые при измерении сравнительные пластины. Модули с кристаллическим кремнием, имеющие стеклянную переднюю и пластиковую заднюю панели, относятся к данной категории. Сравнительные пластины проходят калибрование по методике для первичного метода.

## Результаты исследований

### *Первичный метод*

Данный метод основывается на сборе фактических замеров температурных значений фотоэлемента в различных условиях окружающей среды, включая стандартные эталонные условия SRE. Данные представляются таким образом, что возможна точная и повторяемая интерполяция NOCT.

Температура поверхности солнечного фотоэлемента ( $T_j$ ) изначально является функцией температуры окружающей среды ( $T_{amb}$ ), средней скорости ветра ( $V$ ) и общей энергетической

освещенности солнечного излучения ( $G$ ), падающей на активную поверхность модуля. Разница температур ( $T_j - T_{amb}$ ), главным образом, не зависит от температуры окружающей среды и, по существу, линейно пропорциональна энергетической освещенности при уровнях свыше  $400 \text{ Wm}^2$ . Метод требует построения графика ( $T_j - T_{amb}$ ) относительно  $G$  за период, когда благоприятны показатели ветра. Предварительное значение NOCT далее определяется путем добавления  $20^\circ\text{C}$  к значению ( $T_j - T_{amb}$ ), интерполированному при энергетической освещенности  $800 \text{ Wm}^2$  в стандартных эталонных условиях окружающей среды SRE. В конечном итоге поправочный коэффициент, зависящий от средней температуры и скорости ветра в испытательный период, добавляется к предварительному значению NOCT для его корректировки к  $200^\circ\text{C}$  и  $1 \text{ м/с}$ .

Параметры:

Энергетическая освещенность

Температура окружающей среды

Температура фотоэлемента

Скорость ветра

Направление ветра

Погрешность: общая погрешность номинальной рабочей температуры фотоэлемента должна быть  $\pm 1 \text{ K}$ .

Монтаж тестируемого модуля:

Угол наклона: тестируемый модуль (модули) следует располагать так, чтобы он был ориентирован перпендикулярно направлению на солнце (в пределах  $\pm 5^\circ$ ) в солнечный полдень в данной местности.

Высота: нижний край тестируемого модуля (модулей) должен находиться на расстоянии  $0,6 \text{ м}$  или более над горизонтальной плоскостью площадки, где проводятся испытания или уровнем земли.

Расположение: для имитации тепловых условий модулей, установленных в открытом поле, тестируемый модуль (модули) должен располагаться на плоской поверхности, которая выходит за пределы модуля, по крайней мере, на  $0,6 \text{ м}$  во всех направлениях.

В случае с модулями, разработанными для автономного монтажа, или с открытой задней стороной, необходимо закрепить черные алюминиевые пластины или другие модули такой же конструкции, чтобы заполнить недостающую (до  $0,6 \text{ м}$ ) площадь.

Окружающая обстановка.

В период за 4 часа и 4 часа после солнечного полудня в данной местности не должно быть никаких помех, препятствующих полной солнеч-

ной освещенности тестируемого модуля (модулей). Земля, окружающая модуль (модули), не должна иметь аномально высокого солнечного отражения и должна быть плоской и ровной или иметь уклон от испытательного устройства во все направления (на горе). Трава, другие виды растительности, черный асфальт или грязь являются приемлемыми для окружающей местности.

#### Порядок проведения

1. Установите оборудование с тестируемым модулем (модулями). Удостоверьтесь, что тестируемый модуль (модули) имеет разомкнутый контур.
2. В подходящий ясный, солнечный день при малом ветре отметьте, в зависимости от времени, температуру фотоэлемента, температуру окружающей среды, освещенность, скорость и направление ветра.
3. Отбросьте все данные, полученные при следующих условиях:
  - солнечная освещенность ниже  $400 \text{ Wm}^2$ ;
  - скорость ветра выходит за пределы диапазона  $1 \pm 0,75 \text{ м/с}$ ;
  - температура окружающей среды выходит за пределы диапазона  $20 \pm 15 \text{ }^\circ\text{C}$  или изменяется более, чем на  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
  - 10 минутный интервал после порыва ветра силой более  $4 \text{ м/с}$ ;
  - направление ветра в пределах  $\pm 20^\circ$  на запад или восток.
4. На основе минимум 10 приемлемых замеров, полученных при освещенности, по крайней мере,  $300 \text{ Wm}^2$ , постройте график ( $T_j$  -  $T_{amb}$ ) зависимости от энергетической освещенности. Прочертите прямую линию через точки исходных данных.
5. По прямой линии определите значение ( $T_j$  -  $T_{amb}$ ) при  $800 \text{ Wm}^2$  и добавьте  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  для получения предварительного значения номинальной рабочей температуры фотоэлемента.
6. Рассчитайте среднюю температуру окружающей среды,  $T_{amb}$ , и среднюю скорость ветра,  $V$ , связанные с приемлемыми точками исходных данных, и определите соответствующий поправочный коэффициент по рисунку 1.
7. Добавьте поправочный коэффициент к предварительному значению номинальной рабочей температуры фотоэлемента для ее корректировки к  $20^\circ\text{C}$  и  $1 \text{ м/с}$ . Данная сумма является номинальной рабочей температурой фотоэлемента модуля.
8. Повторите всю процедуру в другой день и

выведите среднее значение обоих определенных номинальной рабочей температуры фотоэлемента, если они в пределах  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Если разница составляет более  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ , то повторите процедуру в третий день и выведите среднее всех трех значений номинальной рабочей температуры фотоэлемента.

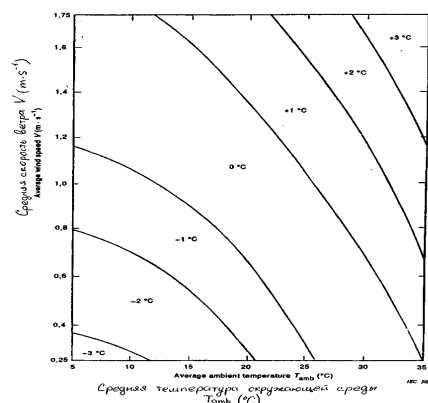


Рис. 1 Поправочный коэффициент NOCT.

#### Метод индикаторных пластин

Данный метод основывается на сравнении температуры тестируемого модуля (модулей) с температурой стандартных индикаторных пластин при таких же значениях энергетической освещенности, температуры окружающей среды и скорости ветра. Установившаяся температура индикаторной пластины в стандартных эталонных условиях SRE определяется с помощью первичного метода.

Номинальную рабочую температуру фотоэлемента NOCT получают путем корректировки разницы между температурами тестируемого модуля и индикаторных пластин к стандартным эталонным условиям SRE и добавления этого значения к средней устоявшейся температуре индикаторных пластин в стандартных эталонных условиях SRE. Было установлено, что измеренная температурная разница нечувствительна к колебаниям энергетической освещенности и к небольшим изменениям температуры окружающей среды и скорости ветра.

Индикаторные пластины должны быть изготовлены из твердого алюминиевого сплава по указанным на рисунке 2 размерам. Передняя поверхность должна быть окрашена черным матовым, а задняя поверхность - блестящим белым. Должны быть в наличии средства для измерения температуры индикаторных пластин с требуемой точностью. На рисунке 3 показан единственный метод с применением двух термопар. Одна

термопара закреплена в каждую ветвь фрезерованной канавки с помощью теплопроводящего и электроизоляционного клея после удаления изоляции на расстоянии 25 мм от места соединения. Оставшиеся провода термопары окончательно закрепляются в канавке с помощью алюминиевой замазки.

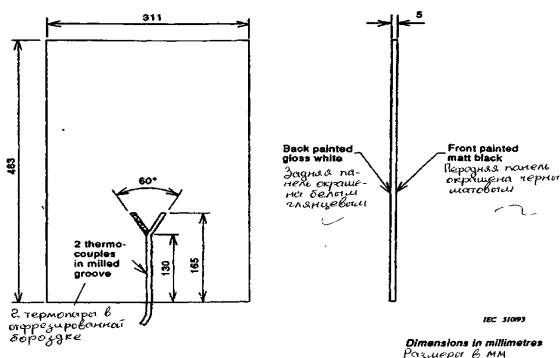


Рис. 2 Эталонная пластина.

По крайней мере, должно быть изготовлено и подвергнуто калиброванию в соответствии с описанным в пункте первичным методом три индикаторных пластины. Определенные таким образом устоявшиеся температуры должны находиться в диапазоне от 46°C до 50°C и не должны различаться более, чем на 1 °C. Одна индикаторная пластина должна оставаться неиспользованной в качестве контрольной. Перед проведением измерения номинальной рабочей температуры фотоэлемента NOCT значения устоявшихся температур индикаторных пластин должны быть сверены с температурой контрольной пластины при требуемых условиях, для выявления любых изменений их тепловых свойств. Если измеренные температуры индикаторных пластин отличаются более, чем на 1°C, то следует выявить причину этого и провести необходимые корректировочные мероприятия перед тем, как продолжить испытание.

Параметры:

Энергетическая освещенность

Температура окружающей среды

Температура фотоэлемента

Скорость ветра

Направление ветра

Температуры индикаторных пластин

Погрешность:

Общая погрешность номинальной рабочей температуры фотоэлемента NOCT должна быть

$\pm 1$  K.

Порядок проведения:

1. Установите оборудование с тестируемым модулем (модулями) и индикаторными пластинами как показано на рисунке 3. Удостоверьтесь, что тестируемый модуль (модули) имеет разомкнутый контур.

2. В подходящий ясный, солнечный день при малом ветре отметьте, в зависимости от времени, температуру фотоэлемента тестируемого модуля (модулей), температуру индикаторных пластин, температуру окружающей среды, энергетическую освещенность, скорость ветра и направление ветра.

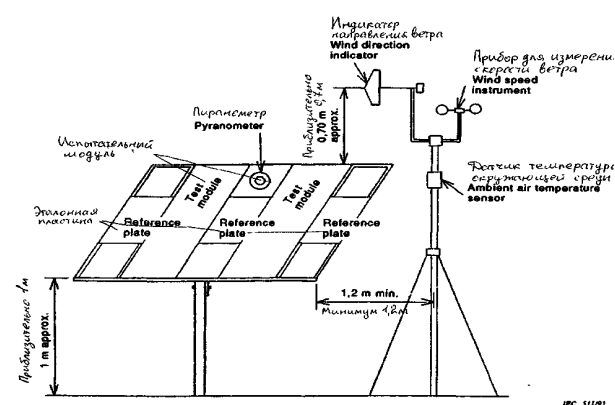


Рис. 3 Измерение NOCT методом эталонных пластин.

3. Отбросьте все данные, полученные при следующих условиях или в течение 15 минут если:

- энергетическая освещенность ниже 750 Wm<sup>2</sup> или выше 850 Wm<sup>2</sup>;
- скорость ветра выше 2 м/с и продолжается более 30 секунд;
- скорость ветра ниже 0,5 м/с;
- направление ветра в пределах  $\pm 20^\circ$  на запад или восток;
- разница между температурами индикаторных пластин больше 1 °C.

4. Для каждой точки исходных данных в выбранный период возьмите среднюю температуру T<sub>P</sub> всех индикаторных пластин.

5. Для каждой точки исходных данных в выбранный период и для каждого тестируемого модуля возьмите среднюю температуру модуля T<sub>j</sub> и рассчитайте:

$$\Delta T_{jp} = T_j - T_p \quad (1)$$

Если  $\Delta T_{jp}$  отличается более, чем на 40 °C, то метод индикаторных пластин не применяется, должен использоваться описанный первичный

метод.

6. Найдите среднее значение всех значений  $\Delta T_{jp}$  для получения  $\Delta T_{jpm}$ .

Откорректируйте  $\Delta T_{jpm}$  согласно стандартным эталонным условиям SRE следующим образом:

$$\Delta T_{jpm} = F * \Delta T_{jpm} / \beta * R \quad (2)$$

где:

$f$  - поправочный коэффициент освещенности - равняется 800, разделенное на среднюю освещенность за выбранный период;

$\beta$  - поправочный коэффициент температуры окружающей среды - берется в зависимости от средней температуры окружающей среды  $T_{amb}$  за выбранный период из нижеприведенной таблицы (применяется линейная интерполяция значений  $\beta$ ).

$R$  - поправочный коэффициент ветра - берется из средней скорости ветра за выбранный период из графика на рисунке 4.

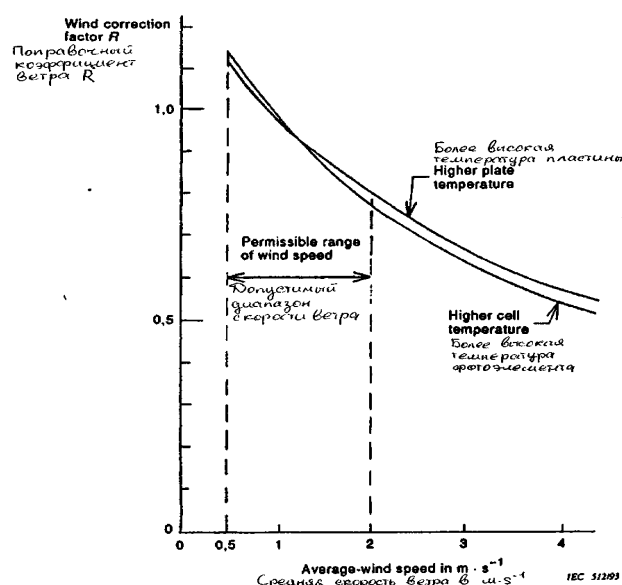


Рис. 4. Поправочный коэффициент ветра.

Рассчитайте номинальную рабочую температуру фотоэлемента NOCT тестируемого модуля следующим образом:

$$NOCT = T_{pr} + \Delta T_{jpm} \quad (3)$$

где  $t_{pr}$  - средняя устоявшаяся температура индикаторных пластин в стандартных эталонных условиях SRE.

7. Повторите всю процедуру в другой день и выведите среднее значение двух определений номинальной рабочей температуры фотоэлемента NOCT для каждого тестируемого модуля, если они в пределах 0,5 °C. Если разница составляет

более 0,5 °C, то повторите процедуру в третий день и выведите среднее из всех трех значений номинальной рабочей температуры фотоэлемента NOCT.

## Выводы

Для промышленного производства кремниевых фотоэлементов и фотоэлектрических модулей необходимо четко знать параметры и продукции, и стандарты измерений, по которым приводится приемка. Для соответствия качеству сертификации необходимо провести исследования в натурных или приближенных к ним условиях. Для этого авторами работы были предложены некоторые методы исследований солнечных элементов.

По результатам исследований можно утверждать, что представленные образцы были протестированы по температурным, электрическим и энергетическим характеристикам и их параметры соответствуют необходимым стандартам качества продукции.

## Список литературы

1. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).
2. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции по температуре и облученности результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 24 с. – (Национальный стандарт России).
3. Кувшинов В.В., Гусева Е.В., Ивантеев И.С. / Повышение энергетических характеристик фотоэлектрических модулей за счет отраженного излучения // Естественные и технические науки. 2021. № 5 (156). С. 216-218.
4. Кувшинов В.В., Бекиров Э.А., Гусева Е.В. Использование фотоэлектрических модулей с двухсторонней приёмной поверхностью для установок малой генерации. Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 20 (72). С. 93-100
5. Абдали Л.М., Исса Х.А., Али К.А., Кувшинов В.В., Бекиров Э.А. Анализ и моделирование автономной фотоэлектрической системы с использованием среды matlab/simulink. Строительство и техногенная безопасность. 2021. № 21 (73). С. 97-105.
6. Абдали Л.М., Кувшинов В.В., Бекиров Э.А., Аль-Руфайи Ф.М. Моделирование параметров

управления интегрированной системой солнечной генерации и накопления энергии. Строительство и техногенная безопасность. 2020. № 18 (70). С. 133-142

7. Кочетов И.А., Старченко М.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Калиев Р.Г. Применение фотоэлектрических панелей нового поколения для увеличения эффективности работы солнечных установок. Энергетические установки и технологии. 2020. Т. 6. № 3. С. 35-39.

## References

1. Photovoltaic devices made of crystalline silicon. Procedure for correcting the results of measuring the current-voltage characteristic (IEC 891-87): GOST 28976-91. - [Enter. 04/19/91]. - М.: ИПК Publishing house of standards, 2004. - 42 p. - (National standard of Russia).
2. Photovoltaic devices made of crystalline silicon. The method of correction for temperature and irradiance of the results of measuring the current-voltage characteristic (IEC 891-87): GOST 28976-91. - [Enter. 04/19/91]. - М.: ИПК Publishing house of standards, 2004. - 24 p. - (National standard of Russia).
3. Kuvshinov V.V., Guseva E.V., Ivanteev I.S. / Increasing the energy characteristics of photovoltaic modules due to reflected radiation // Natural and technical sciences. 2021. No. 5 (156). S. 216-218.
4. Kuvshinov V.V., Bekirov E.A., Guseva E.V. The use of photovoltaic modules with a double-sided receiving surface for low-generation installations. Construction and man-made safety. 2021. No. 20 (72). S. 93-100
5. Abdali L.M., Issa Kh.A., Ali K.A., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A. Analysis and modeling of an autonomous photovoltaic system using matlab / simulink environment. Construction and man-made safety. 2021. No. 21 (73). S. 97-105.
6. Abdali L.M., Kuvshinov V.V., Bekirov E.A., Al-Rufai F.M. Modeling the control parameters of an integrated solar generation and energy storage system. Construction and man-made safety. 2020. No. 18 (70). S. 133-142
7. Kochetov I.A., Starchenko M.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Kaliev R.G. The use of new generation photovoltaic panels to increase the efficiency of solar installations. Power plants and technologies. 2020. Vol. 6. No. 3. P. 35-39.

УДК 620.92

## Перспективы развития малой ветроэнергетики в Российской Федерации

В.В.Кувшинов<sup>1</sup>, Е.Г. Какушина<sup>2</sup>, Н.А. Власов<sup>3</sup>, Д.Ф. Бордан<sup>4</sup>, Р.А. Нашев<sup>5</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>kuvshinov.vladimir@gmail.com <sup>2</sup>littie@mail.ru, <sup>3</sup>vlasov@mail.ru  
<sup>4</sup>bordan79@mail.ru, <sup>5</sup>nashev@mail.ru

Статья поступила 30.08.2021 г.; после доработки 31.08.2021 г.

### Аннотация

Одним из главных условий внедрения ветроэнергетических установок для автономного потребителя является обеспечение недорогими ветротурбинами отечественного производства частных хозяйств и малых поселений, в частности для районов крайнего севера. Мировое производство ветростанций (ВЭС) в настоящее время ограничено перспективными территориями с большим ветропотенциалом. Установка малых ВЭС создаст возможности большего внедрения ветроэнергетики в Российском и мировом масштабе.

**Ключевые слова:** ветроэнергетика, ветровые генераторы, ветроэлектрические станции, малые ветроэлектрические установки, ветротурбины.

## Prospects for the development of small-scale wind power in the Russian Federation

V.V. Kuvshinov<sup>1</sup>, E.G. Kakushina<sup>2</sup>, N.A. Vlasov<sup>3</sup>,  
D. F. Bordan<sup>4</sup>, R. A. Nashev<sup>5</sup>

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
<sup>1</sup>kuvshinov.vladimir@gmail.com <sup>2</sup>littie@mail.ru, <sup>3</sup>vlasov@mail.ru  
<sup>4</sup>bordan79@mail.ru, <sup>5</sup>nashev@mail.ru

Received 30.08.2021 y.; received in final form 31.08.2021 y.

### Abstract

One of the main conditions for trouble-free operation of a wind generator is a reliable attachment of the blades. The terms of checking the nodes, the strength of their fastening, as well as the reliability of other elements of the installation, are regulated by the manufacturer and are reflected in its passport and operating instructions.

**Keywords:** wind power, wind generators, wind power plants, small wind power plants, wind turbines.

### Введение

Ветроэнергетика – это направление альтернативной энергетики, основанной на использовании возобновляемого источника энергии, которым является ветер. Кроме этого, в соответствии с состоянием развития на текущий момент и количеством производимой энергии, ветроэнергетика является отдельной отраслью производства различных видов энергии, таких как: электрическая, механическая, тепловая и т. д. Во

всех случаях первичным источником служит кинетическая энергия ветра, путем использования различных механизмов, преобразуемая в требуемый вид энергии.

С начала XX века, с постепенным внедрением электричества в повседневную жизнь человека, использование ветровых установок было одним из способов получения электрической энергии. В разные годы эта отрасль переживала взлеты и падения, вызванные состоянием экономики страны, успехами в развитии технических

устройств и потребностью в источниках энергии. Россия — это большая страна, и благодаря своей значительной площади, а также расположением в различных географических и климатических зонах, обладает огромным потенциалом использования ветровой энергии [1]. По данным экспертов, потенциал оценивается в более, чем в 50000 млрд.кВт.час электрической энергии в год, что может составлять до 30% производимой электроэнергетики энергосистемой страны.

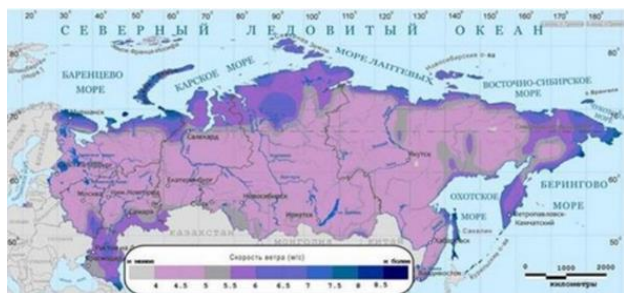


Рис.1. Карта ветровых зон

Из приведенной карты видно, что потенциально, использование ветровых установок, возможно на значительной территории страны. Наиболее благоприятные районы, это: прибрежные территории северных, Черного, Каспийского и Азовского морей, полуостров Камчатка, остров Сахалин, внутренняя территория страны от Волги и Дона, до Карелии, Алтая и Тувы.

В настоящее время развитию ветроэнергетики уделяется повышенное внимание, поэтому в последние годы, наблюдается динамика роста по вводу в эксплуатации энергетических мощностей, что видно из приведенной ниже диаграммы на рисунке 2:



Рис.2. Диаграмма мощностей ВЭС в РФ

Использование ветровых генераторов, в разных регионах страны, получило неравномерное распространение, что обусловлено наличием определенных погодных условий, различных

технических и финансовых возможностей регионов, а также потребностью в электрической энергии.

Так присутствие ветроэнергетических компаний в различных регионах выглядит следующим образом:

Суммарная установленная мощность ветровых электростанций составляет более 75,0 МВт, наиболее крупные это:

Расположенные в Крыму:

- Донузлавская ВЭС, мощность установленных генераторов составляет 18,7 МВт;
- Останинская ВЭС, мощность установленных генераторов составляет 26,0 МВт;
- Тарханкутская ВЭС, мощность установленных генераторов составляет 15,9 МВт;
- Восточно-Крымская ВЭС, мощность установленных генераторов составляет 2,8 МВт.

В Калининградской области - Зеленоградская ВЭУ, мощность установленных генераторов составляет 5,1 МВт;

На Чукотке - Анадырская ВЭС, мощность установленных генераторов составляет 2,5 МВт;

В Республике Башкортостан - ВЭС «Тюпкильды», мощность установленных генераторов составляет 2,2 МВт;

В республике Калмыкия - ВЭС компании ООО «АЛТЭН», мощность установленных генераторов составляет 2,4 МВт;

В Мурманской области - ветродизельная электростанция, на мысе Сеть-Наволоок, мощность установленных генераторов составляет 0,1 МВт;

На острове Беринга Командорских островов - ВЭС, мощностью установленных генераторов 1,2 МВт.

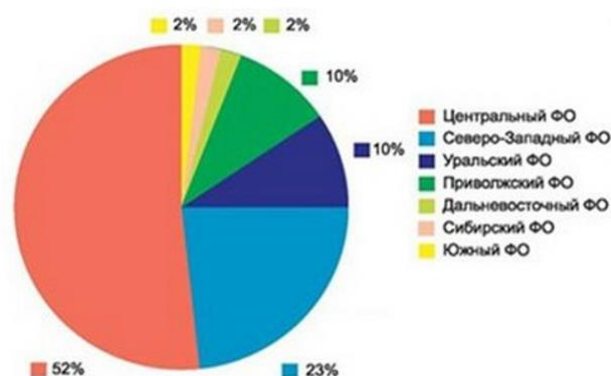


Рис.3. Диаграмма ВЭС в ФО РФ

В различной стадии строительства, подготовки исходных данных и разработки техниче-

ской документации, находятся следующие станции:

- Заполярная ВДЭС (3,0 МВт) и Новиковская ВЭС (10,0 МВт) в Республике Коми;
- - Ленинградская ВЭС (75,0 МВт), в Ленинградской области;
- Ейская ВЭС (72,0 МВт), Анапская ВЭС (5,0 МВт) и Новороссийская ВЭС (5,0 МВт) в Краснодарском крае;
- Морская ВЭС (50,0 МВт) в Калининградской области;
- Морская ВЭС (30,0 МВт) и Валаамская ВЭС (4,0 МВт) в Республике Карелия;
- Приморская ВЭС (30,0 МВт) в Приморском крае;
- Магаданская ВЭС (30,0 МВт) в Магаданской области;
- Чуйская ВЭС (24,0 МВт) в Республике Алтай;
- Усть-Камчатская ВДЭС (16,0 МВт) в Камчатской области;
- Дагестанская ВЭС (6,0 МВт) в Дагестане;
- Приютненская ВЭС (51,0 МВт) в Республике Калмыкия.

Государство уделяет внимание на развитие альтернативных источников энергии, принимаются программы по поддержке и стимулирования этой отрасли энергетики на федеральном и региональных уровнях. В стране появляются новые организации, которые занимаются ветроэнергетикой, создаются отечественные образцы ветровых установок различной мощности и конструкций.

### Постановка цели исследования

Технически развитые страны также не обходят своим вниманием альтернативные источники энергии. За последние годы, доля ветроэнергетики, в общем количестве вырабатываемой электрической энергии, в разных странах, на разных континентах, постоянно увеличивается, что видно на приведенной ниже диаграмме на рисунке 4:

В странах Европы, Китае и США, правительства уделяют большое внимание этой отрасли энергетики. Предприятия, работающие в данной сфере, получают различные льготы, им оказывается финансовая помощь. Лидером, среди европейских стран, по использованию ветровых установок, является Германия, за ней идет Испания и Дания. Распределение мощностей, в

процентном соотношении, среди стран, приведено на ниже следующей диаграмме.

В настоящее время, наиболее крупные ветровые установки, работают в странах Европы, это:

#### 1) В Германии:

Ветряные электростанции Германии производят более 8,0 % от всей произведённой электроэнергии. Установленная мощность ветровых генераторов превышает 45000,0 МВт.

#### 2) В Испании:

Ветроэнергетика в Испании широко распространена как в частном секторе, так и при промышленном производстве электрической энергии. Доля производимого электричества ветровыми генераторами составляет более 20% от общего количества производимой электрической энергии.

#### 3) В Дании:

Дания является первопроходцем в деле использования энергии ветра для получения электрической энергии в промышленных масштабах. История ветроэнергетики этой страны началась в 70-х годах XX века и по настоящее время, Дания является лидером по производству ветровых генераторов и их комплектующих. Ветроэнергетика Дании производит более 40% электрической энергии в общей доле производимого электричества в стране.

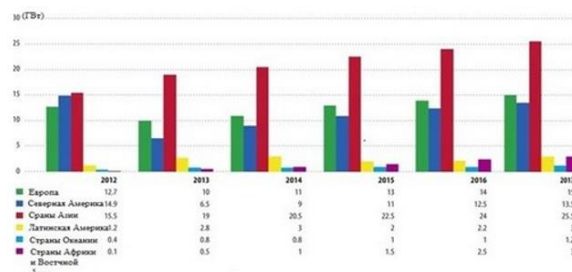


Рис.4. Диаграмма мощностей ВЭС в мире

Если посмотреть на карту ветряных электростанций Европы, составленная агентством SETIS при Еврокомиссии, приведенную ниже на рисунке 6, то отчетливо видно, что Германия является несомненным лидером из европейских стран, по количеству ветровых генераторов (места установки помечены синими кружками). Из смонтированных в Европе, наиболее крупной является ветряная ферма Уитли (Whitelee). Она смонтирована в Шотландии и состоит из 140 турбин.

В прочих государствах нашей планеты ис-

пользование ветровых установок выглядит следующим образом:

В США:

В этой стране, ветроэнергетика как отрасль, развивается довольно быстро. Установленная мощность ветровых генераторов составляет более 75,0 ГВт. В общей доле вырабатываемой электрической энергии, доля ветроэнергетики составляет более 5,0 %. Ветровые электростанции построены в 34 штатах, из наиболее энергоемкие, это в таких штатах как:

- Техас – установленная мощность ветровых генераторов более 14000,00 МВт;
- Калифорния и Айова — установленная мощность ветровых генераторов более 5000,00 МВт;
- Оклахома, Иллинойс, Орегон, Вашингтон, Миннесота — установленная мощность ветровых генераторов более 3000,00 МВт;
- Канзас и Колорадо — установленная мощность ветровых генераторов более 2000,00 МВт.

Наиболее крупная станция Сан Горгио Пасс расположена в Калифорнии, способна вырабатывать более 600,0 МВ электрической энергии, в ее состав входит 3218 турбин. Построено более 50 заводов по производству ветровых установок и их комплектующих.

В Китае:

Промышленный рост не обошел стороной и ветроэнергетическую отрасль Китая. В настоящее время, установленная мощность ветровых генераторов составляет более 150,0 ГВт.

В доле производимой электрической энергии в стране, доля ветроэнергетики составляет более 3,0 %. Энергетики Китая продолжают строительство новых ветровых электростанций, в период до 2020 года, планируется запустить в работу еще 100 ГВт электрических мощностей. Наибольшим потенциалом обладают провинции Внутренняя Монголия и Синьцзян-Уйгурский автономный район.

В Канаде:

Благодаря своему географическому расположению Канада имеет огромный потенциал в сфере развития ветроэнергетики.

Ветровые генераторы успешно работают во всех провинциях страны. Доля производимой электрической энергии ветровыми установками, в общем количестве электричества, составляет более 1,0 %. Установленная мощность ветровых генераторов составляет более 2000,0 МВт.

В Индии:

Индия также является одним из лидеров в

использовании ветра для производства электрической энергии. Установленная мощность ветровых генераторов превышает 27000,0 МВт. Доля электроэнергии, вырабатываемая ветровыми генераторами, превысила 6,0 % от общего количества производимой электрической энергии в стране.



Рис.5. Доля ветроэнергетики в мире

#### Перспективы развития

Принимая во внимание, что традиционные источники энергии имеют свойство заканчиваться, а их использование приводит к загрязнению атмосферы планеты, то все большее количество стран, принимают внутренние и межгосударственные соглашения о защите экологии и контролю за потреблением энергоресурсов. В развитие этой тенденции, использование возобновляемых источников энергии, к тому же являющихся экологически чистыми, является очень актуальным. Для стимулирования развития отрасли, в ряде стран разработаны направления деятельности, в этой области энергетики, это: Развитие морских ветропарков; Мотивация населения и промышленности в установке ветровых генераторов; Наращивание процента ветровой энергетики в общем энергопотреблении. В связи с этим, развитие ветроэнергетики, как источника альтернативной энергии, постоянно продолжается и будет иметь тенденцию к ускорению этого процесса [2] Ярким примером таких разработок являются плавающие и парящие ветровые генераторы. Плавающие ветровые генераторы – монтируются вдали от берега, на глубине 100 и более метров. Первые подобные устройства, были смонтированы в 2007 году, в Норвегии. В связи с тем, что на поверхности моря всегда, за редким исключением бывает полный штиль, присутствует движение воздушных масс, то КПД установок смонтированных подобных образом, выше, чем у монтируемых на поверхности земли. Парящие ветровые генераторы –

представляют из себя надувную сферу, наполненную гелием, и турбины, расположенной по центру устройства. К тому же конструкторы и разработчики не останавливаются на достигнутом, работы продолжают в постоянном режиме.

Плюсы и минусы:

К достоинствам, использования ветровых установок можно отнести следующие:

- Это неисчерпаемый, возобновляемый самой природой, источник энергии, потому как пока светит солнце, будет и движение воздушных потоков, которые и являются первичной силой, благодаря которой, производится электрическая энергия.
- Производство энергии при помощи воздушных масс, это экологически чистый процесс, не наносящий вреда окружающей среде.
- Строительство объектов ветроэнергетики – это непродолжительное по времени мероприятие, поэтому быстрый монтаж ветровых установок, определяет относительно невысокую стоимость монтажных работ, в сравнении со строительством прочих объектов энергетики.

К недостаткам ветроэнергетики относятся:

- КПД установок, в своей работе использующих энергию ветра, зависит от географического месторасположения, погодных условий, сезона и времени суток. Этот недостаток определяет возможность использования ветровых генераторов в том либо ином регионе планеты.
- При устройстве генерирующих установок большой мощности требуются значительные земельные участки, которые приходится выводить из общего оборота земель.
- Потребность в начальных значительных затратах, наличие которых подразумевает инвестирование данной отрасли, на начальном этапе развития.
- Потенциальная опасность для птиц и прочих летающих организмов.
- Наличие отрицательных качеств, которыми обладает ветроэнергетика, не может перевесить количество положительных.

С уверенностью можно констатировать, что такая область энергетики, как ветроэнергетика, будет развиваться и в дальнейшем.

## Результаты проведенного исследования

Умея работать с различным ручным инструментом и приняв решение построить ветровой

генератор своими силами, лопасти такого устройства, также можно изготовить самостоятельно. В этом случае выбор материала, используемого для изготовления, зависит от имеющегося в наличии, и это могут быть следующие варианты:

Изготовление ветрогенератора из ПВХ трубы

В этом случае используются трубы, используемые для сетей канализации или водопровода, большого диаметра и обладающие высокой прочностью, что обусловлено их применением в сетях с избыточным давлением. Расчет формы лопасти произвести самостоятельно довольно таки сложно, поэтому оптимальный вариант, это найти шаблон требуемого размера. Для этого можно воспользоваться специализированной литературой, журналами или интернет ресурсами, в которых приводится большое количество разнообразных по конфигурации и геометрическим размерам изделий. По шаблону, на поверхности трубы, наносятся размеры, после чего, при помощи режущего инструмента, выполняется выпиливание лопастей, как на ниже приведенном рисунке.

Из стеклопластика

При использовании стеклопластика (стекловолокна), вначале из дерева изготавливается шаблон, по которому в дальнейшем, и изготавливаются элементы лопастей. Как правило, в этом случае, они делаются полыми, при необходимости возможна установка усиливающих лонжеронов и заполнении пустот различными компонентами. При создании шаблона, поверхность лопасти условно делится по горизонтальной оси, после чего получается шаблон нижней и шаблон верхней частей. По изготовленному основанию (шаблону), который можно назвать матрицей, изготавливаются отдельные элементы лопасти. Для этого по матрице, с использованием эпоксидной смолы и отвердителя, наносятся несколько слоев стекловолокна, которое должно затвердеть.

После застывания, внутрь поверхности изготавливаемого изделия, устанавливаются лонжероны и уплотнитель (в хвостовую часть). Уплотнитель укладывается в случае необходимости, что должно быть подтверждено соответствующим расчетом или обоснованием, приведенном в технической литературе, где был взят шаблон [4] Изготовленные части соединяются между собой при помощи клея, в комлевой части, монтируется хвостовик, с помощью которого лопасть крепится к валу ветрового генератора.

При выполнении работ потребуются следующий инструмент: Ножовки различного типа, в зависимости от используемого материала; Ножницы по металлу или ручной электрический инструмент (лобзик, «болгарка» и т.д.); Маркеры и чертилки, используемые для разметки изготавливаемых деталей; Абразивные материалы: наждачная бумага, шлифовальные круги для углошлифовальной машинки, напильники – используемые для обработки поверхностей.

Ветрогенератор и его комплектующие, это специализированный товар, который не реализуется в обычных торговых сетях, что обуславливает не широкий круг фирм его реализующий. При возникновении потребности в приобретении комплекта лопастей или их отдельных элементов, лучше всего обратиться к фирме выпускающей подобное оборудование. При наличии и эксплуатации генератора определенной марки, следует обращаться к его производителю, что позволит избежать сложностей при монтаже, а также сохранит технические характеристики устройства и не нарушит условий его эксплуатации. При изготовлении ветрового генератора своими силами, лопасти можно приобрести заводского производства, которые реализуются специализированными торговыми организациями и интернет-магазинами.

## Выводы

В связи с подписанием целого ряда международных договоров и с программами развития государственной энергетики РФ обязуется наращивать долю генерирующих установок на основе НВИЭ.

В процессе развития возобновляемой энергетики в России, необходимо наращивать долю ветротурбин не только большой, но и малой мощности. Развитие малой ветроэнергетики в РФ является необходимым условием стабильного развития альтернативной и возобновляемой энергетики в целом.

Размещение малых ВЭУ по малозаселенной территории страны значительно обеспечивает стабильность использования НВИЭ и увеличивает систему распределённой генерации.

Увеличение доли автономных ВЭУ малой мощности для электроснабжения индивидуальных потребителей способствует процессу электрификации районов РФ неподключенных к централизованным поставкам электроэнергии.

## Список литературы

1. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев

энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.

2. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. //Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
3. Кувшинов В.В. Экспериментальное исследование энергетических характеристик солнечных установок в районе Севастополя. /Какушина Е.Г., Кувшинова В.В., Аджиев О.У., Бердышев К.Ю.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 104-110.
4. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.

## References

1. Vologdin S. V. Analiz razlichnykh scenariy energosnabzheniya Kryma s uchetom rezhimov work solar power plants / Yakimovich B. A., Kuvshinov V. V., AbdAli L. M., Kakushina, E. G. et al. / / Appl.Sol. Energy, 2019, Vol. 55, no. 4, pp. 229-234.
2. Zaichenko V. M. Directions of energy development / Chernyavsky A. A., Kuvshinov V. V., Kakushina E. G., Abeidulin S. A. //Power plants and technologies. 2019-Vol. 5. No. 3. pp. 53-61.
3. Kuvshinov V.V. An experimental study of the energy characteristics of solar plants in the region of Sevastopol. / Kakushina E.G., Kuvshinova V.V., Adzhiev O.U., Berdyshev K.Y..// Power Plants and Technologies - 2019.V. 5. No. 2. P. 104-110.
4. Guryev, V. V., Development of renewable IP-source of electricity in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kaku bus E. G., B. A. Yakimovich, Kuvshinov V. V.//Energy and technology 2019. Vol. 5 No. 2. pp. 90-93.

УДК 620.92

## Производство тепловой и электрической энергии на основе мусороперерабатывающих комплексов

В.В.Кувшинов<sup>2</sup>, Е.Г. Какушина<sup>3</sup>, Д.Ф. Бордан<sup>3</sup>,  
И.Г. Жиганов<sup>4</sup>, И.А. Ивантеев<sup>5</sup>

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>kuvshinov.vladimir@gmail.com <sup>2</sup>little@mail.ru, <sup>3</sup>bordan79@mail.ru,  
<sup>4</sup>ZiganobI@mail.ru, <sup>5</sup>ivanteev@mail.ru

Статья поступила 01.09.2021 г.; после доработки 03.09.2021 г.

---

### Аннотация

*В условиях постоянного ухудшения экологической обстановки возрастает необходимость обеспечить максимально возможную безвредность технологических процессов и безопасную утилизацию отходов.*

*Ключевые слова:* твердые бытовые отходы, переработка отходов, обезвреживание отходов

---

## Production of heat and electric energy on the basis of waste processing complexes

V.V. Kuvshinov<sup>1</sup>, E.G. Kakushina<sup>2</sup>, D.F. Bordan<sup>3</sup>,  
I.G. Zhiganov<sup>4</sup>, I.A. Ivanteev<sup>5</sup>

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
<sup>1</sup>kuvshinov.vladimir@gmail.com <sup>2</sup>little@mail.ru, <sup>3</sup>bordan79@mail.ru, <sup>4</sup>ZiganobI@mail.ru, <sup>5</sup>ivanteev@mail.ru

Received 01.09.2021 y.; received in final form 03.09.2021 y.

---

### Abstract

*In the conditions of constant deterioration of the environmental situation, the need to ensure the maximum possible harmlessness of technological processes and safe waste disposal increases.*

*Keywords:* solid household waste, waste processing, waste disposal

---

### Введение

Жизнедеятельность человека связана с появлением огромного количества разнообразных отходов. Резкий рост потребления в последние десятилетия привел к существенному увеличению объемов образования бытовых отходов.

Отходы при бесконтрольном размещении засоряют и захламляют окружающий нас природный ландшафт, являются источником поступления вредных химических, биологических и биохимических препаратов в окружающую природную среду. Это создает определенную

угрозу здоровью и жизни населения.

Решение проблемы переработки отходов приобретает за последние годы первостепенное значение.

В условиях постоянного ухудшения экологической обстановки возрастает необходимость обеспечить максимально возможную безвредность технологических процессов и безопасную утилизацию отходов.

Твёрдые бытовые отходы (ТБО, бытовой мусор) — предметы или товары, потерявшие потребительские свойства. ТБО делятся также на

отбросы (биологические ТО) и собственно бытовой мусор (небиологические ТО искусственного или естественного происхождения), а последний часто на бытовом уровне именуются просто мусором.

По морфологическому признаку ТБО в настоящее время состоит из следующих компонентов:

- Биологические отходы:
  - Кости
  - Пищевые и растительные отходы (помои, отбросы)
- Синтетические отходы:
  - Старые автопокрышки
- Целлюлозной переработки:
  - Бумага — газеты, журналы, упаковочные материалы
  - Древесина
- Нефтепродукты:
  - Пластмассы
  - Текстиль
  - Кожа, резина
- Различные металлы (цветные и чёрные)
  - Стекло
  - Смёт

Фракционный состав ТБО (массовое содержание компонентов, проходящих через сита с ячейками разного размера) сказывается как на сборе и транспортировке отходов, так и на технологии их последующей переработки, сортировки. Состав ТБО отличается в разных странах, городах. Он зависит от многих факторов, включая благосостояние населения, климат и благоустройство. На состав мусора существенно влияет система сбора в городе стеклотары, макулатуры и т. д. Он может меняться в зависимости от сезона, погодных условий. Так на осень приходится увеличение количества пищевых отходов, что связано с большим употреблением овощей и фруктов в рационе питания. А зимой и весной сокращается содержание мелкого отсева (уличного смета). С течением времени состав ТБО несколько меняется. Увеличивается доля бумаги и полимерных материалов

### Постановка цели исследования

Твердые бытовые отходы составляют большую часть всех отходов потребления. Ежегодно количество твердых бытовых отходов по всему миру увеличивается на 3%. В странах СНГ образуется 100 млн. тонн твердых бытовых отходов в год. И почти половина этого объема приходится

на Россию.

Наибольшую проблему представляют муниципальные твердые бытовые отходы - ТБО, которые составляют около 8-10% от общего количества образующихся отходов. Это связано со сложным составом ТБО и распределенными источниками их образования.

В России доля городского населения составляет 73%, что несколько ниже уровня европейских стран. Но, несмотря на это, концентрация ТБО в крупных городах России сейчас резко возросла, особенно в городах с численностью населения от 500 тыс. человек и выше. Объем отходов все увеличивается, а территориальные возможности для их утилизации и переработки уменьшаются. Доставка отходов от мест их образования до пунктов утилизации требует все больше времени и средств.

В настоящее время в большинстве случаев отходы просто собираются для захоронения на полигонах, что ведет к отчуждению свободных территорий в пригородных районах и ограничивает использование городских территорий для строительства жилых зданий. Также совместное захоронение различных видов отходов может привести к образованию опасных соединений.

По данным Росприроднадзора, ежегодно в России образуется порядка 35-40 млн. тонн твердых бытовых отходов и практически весь этот объем размещается на полигонах ТБО, санкционированных и не санкционированных свалках, и только 4-5% вовлекается в переработку. Это прежде всего связано как с отсутствием необходимой инфраструктуры, так и самих предприятий - переработчиков, которых по стране насчитывается всего порядка 400 единиц. Также следует обратить внимание на то, что количество специально обустроенных мест для размещения отходов — полигонов ТБО в целом по стране около полутора тысяч (1399), что в разы меньше, чем даже санкционированных свалок, которых чуть больше 7 тысяч (7153). А количество несанкционированных свалок, которые следует расценивать как уже накопленный за истекшие десятилетия прошлый экологический ущерб, по состоянию на август текущего года превышает и указанную цифру в 2,5 раза и составляет 17,5 тысяч. Все указанные объекты размещения ТБО занимают площадь более 150,0 тыс. Га [1].

Санитарная очистка жилых районов и микрорайонов от твердых домашних отходов, представляет собой комплекс мероприятий по их

сбору, удалению, обезвреживанию и утилизации.

Очистка жилых районов от ТБО складывается из различных операций. Пока не сложилось единой системы, и существует достаточно большое разнообразие различных способов и методов сбора, удаления и обезвреживания ТБО.

В основном, приняты два способа сбора — унитарный и раздельный. При унитарном способе все отходы собираются в единый мусоросборник, при раздельном — ТБО собирают по видам отходов (стекло, бумага, цветной металл, пищевые отходы и т.д.) в разные мусоросборники. Эта схема требует специальных транспортных средств для вывоза собранных ТБО, но позволяет собирать сырье для вторичной переработки, пищевые отходы, значительно уменьшает объемы отходов, требующих обезвреживания.

Дворовые сборники и контейнеры устанавливают в микрорайонах на специальных площадках, которые размещают на хозяйственных дворах, со стороны торцевых стен зданий или между зданиями, но с обязательным ограждением зелеными насаждениями или невысокими стенками.

Площадки мусоросборников и павильоны следует размещать среди жилой застройки таким образом, чтобы создать максимальные удобства жителям при пользовании мусоросборниками, обеспечить удобный проезд транспорта, вывозящего мусор, исключить возможность загрязнения почвы и воздуха, обеспечить соответствие современным эстетическим требованиям [1].

Одним из направлений обращения с отходами является раздельный сбор и переработка вторичного сырья в пригодную для использования продукцию.

Система раздельного сбора отходов и вторичного сырья позволит решить проблему утилизации отходов, привлечь малый бизнес в эту сферу деятельности и повысить эффективность санитарной очистки города. Это наиболее эффективное решение проблемы уменьшения количества отходов, вывозимых на полигон. С целью повышения эффективности системы сбора и переработки вторичного сырья необходима работа, направленная на создание современных технологий переработки для производства конкурентоспособной продукции. Система раздельного сбора и переработки должна быть хорошо управляемой структурой, действующей на постоянной основе, применяющей современные методы регулирования и контроля.

Разделение отходов по фракциям (раздель-

ное складирование) является наиболее приемлемым вариантом утилизации мусора. В этом случае, значительно уменьшаются затраты на повторную переработку, а неиспользуемые остатки, составляют не более 15% от общей массы (Европейская практика).

Вывоз ТБО производится на специально оборудованную площадку — полигон твердых бытовых отходов, мусороперерабатывающий либо мусоросжигающий завод. Со всеми предприятиями, утилизирующими, перерабатывающими или захоранивающими бытовой мусор, профильная компания, специализирующаяся на сборе и транспортировке отходов, должна заключить договор. Лишь в этом случае ее деятельность будет легальной.

### Результаты проведенного исследования

Переработка — повторное использование или возвращение в оборот отходов производства или мусора. Наиболее распространена вторичная, третичная и т. д. переработка в том или ином масштабе таких материалов, как стекло, бумага, алюминий, асфальт, железо, ткани и различные виды пластика.

Также, с глубокой древности используются в сельском хозяйстве органические сельскохозяйственные и бытовые отходы.

К основным видам обращения с отходами относятся:

- хранение отходов - содержание отходов в объектах размещения отходов в целях их последующего захоронения, обезвреживания и использования;
- захоронение отходов - изоляция отходов, не подлежащих дальнейшему использованию, в специальных хранилищах в целях предотвращения попадания вредных веществ в окружающую природную среду;
- обезвреживание отходов - обработка отходов, в том числе их сжигание и обеззараживание на специализированных установках, в целях предотвращения вредного воздействия отходов на здоровье человека и окружающую природную среду.
- использование отходов - применение отходов для производства товаров (продукции), выполнения работ, оказания услуг и для получения электроэнергии.

Объект размещения отходов - специально оборудованное сооружение, предназначенное

для размещения отходов (полигон, шламохранилище, отвал горных пород и др.).

Обезвреживание отходов

Термические методы. К термическим методам обезвреживания отходов относятся мусоросжигание и пиролиз.

Мусоросжигание является одним из быстрых и радикальных методов обезвреживания твердых бытовых отходов. Его проводят в специальных печах-деструкторах при температуре 900—1000 °С, при которой разрушаются почти все органические твердые, жидкие и газообразные соединения. Отходы с влажностью до 60%, зольностью до 60% и содержанием горючих компонентов (органических веществ) более 20% горят без добавления топлива. Кроме того, за счет значительной теплообразующей способности (4—8 мДж/кг) отходов в процессе их сжигания образуется энергия, которую можно использовать в народном хозяйстве.

В то же время в процессе мусоросжигания возникает необходимость в складировании твердых продуктов неполного сгорания (шлака и золы) и очистке выбросов в атмосферный воздух. В среднем вследствие сжигания 1 т твердых бытовых отходов образуется почти 300 кг шлака и 6000 м<sup>3</sup> дымовых газов, из которых на очистных сооружениях задерживается 30 кг золы. Шлак и зола содержат значительное количество кремния (до 65%), щелочные и щелочноземельные металлы, алюминий, железо, свинец, цинк и др. Кроме того, в золе могут содержаться диоксины — полихлорированные дибензодиоксины и полихлорированные дибензофураны. Эти вещества (их может быть более 210, в зависимости от количества атомов хлора и их размещения в молекуле) оказывают канцерогенное, гепатотоксическое, нейротоксическое действие, угнетают иммунную систему, способны проходить через плаценту, накапливаться в грудном молоке. Самым токсичным и опасным для здоровья людей является 2,3, 7, 8-тетрахлордибензодиоксин. Опасны эти вещества также из-за их чрезвычайной стабильности в окружающей среде. Поэтому складировать золу необходимо так же, как и токсические промышленные отходы, т. е. на специальных полигонах. Шлак можно складировать на усовершенствованных свалках или даже использовать, например, в строительстве для улучшения рельефа местности. Позитивным является то, что площадь для складирования шлака и золы в 20 раз меньше, чем для свалок твердых бытовых отходов.

Дымовые газы, образующиеся во время мусоросжигания, содержат, кроме золы (2—10

г/м<sup>3</sup>), углерода диоксид — CO<sub>2</sub> (15%), углерода оксид — CO (0,05%), серы диоксид (SO<sub>2</sub>), азота оксиды, HCl, HF, а также полихлорированные дибензодиоксины и дибензофураны. Во время сжигания 1 т отходов может образоваться 5 мкг диоксинов, большая часть которых связана с золой, а меньшая — остается в дымовых газах. Диоксины могут содержаться как в собственно отходах, так и образовываться в процессе охлаждения дымовых газов после сжигания мусора. Во время сжигания при температуре 1000 °С диоксины, содержащиеся в отходах, разрушаются. Но при охлаждении дымовых газов до 250—350 °С. Они могут образовываться из органического углерода и хлоридов в присутствии водяного пара и ионов меди. Поэтому обязательной является очистка дымовых газов перед их выбросом в атмосферный воздух. Для задержки золы используют электрофильтры и рукавные фильтры, которые дают возможность уменьшить концентрацию золы в выбросах с 2000—10 000 до 10—50 мг/м<sup>3</sup>. Для газоочистки применяют сухие и влажные методы, эффективность которых составляет в среднем почти 70 и 90% соответственно.

Мусоросжигательные печи должны находиться на расстоянии не менее 300 м от жилых кварталов. Печи большой производительности и связанные с ними сооружения (для загрузки мусора, его перемешивания, очистки выбросов в атмосферный воздух и др.) называются мусоросжигательными станциями или заводами.

Таким образом, обезвреживание твердых бытовых отходов на мусоросжигательных заводах при условии соблюдения санитарно-гигиенических требований по их оборудованию и эксплуатации имеет гигиеническое, эпидемиологическое и экономическое преимущество, заключающееся в том, что обезвреживание происходит радикально и быстро. Отпадает необходимость в вывозе мусора далеко за город, т. е. сокращаются транспортные расходы, не требуются значительные по площади земельные участки, могут быть использованы тепло, пар и шлак. Именно этим обусловлено широкое использование мусоросжигания в мире.

Пиролиз. Процесс пиролиза твердых бытовых отходов осуществляется в высокотемпературных реакторах при температуре почти 1640 °С в условиях дефицита кислорода и не требует их предварительной подготовки. Высокая температура обеспечивает разрушение практически всех сложных органических веществ, превращение их в простые горючие (горючий газ, нефте-

подобные масла) или негорючие (шлак) соединения. Во время пиролиза твердых бытовых отходов не образуется выбросов в окружающую среду. Такой метод обезвреживания отходов с гигиенической и экономической точки зрения весьма перспективный.

**Химические методы.** К химическим методам обезвреживания твердых бытовых отходов относится их гидролиз в присутствии хлористоводородной или серной кислоты при высокой температуре с целью получения этилового спирта, витаминов группы В, РР, D и других важных продуктов. Кроме того, отходы гидролизного завода могут быть использованы в виде биотоплива и органических удобрений. При внесении этих удобрений на поля черноземной зоны урожайность картофеля становится в 2 раза больше по сравнению с полями, обработанными другими компостами. Гидролизный метод обеспечивает безотходную технологию производства при соблюдении требований по санитарной охране окружающей среды.

**Механические методы.** К механическим методам обезвреживания твердых отходов относится изготовление разных блоков (крупнообъемных брикетов, строительных материалов) путем их прессования и использования специальных связующих веществ. В настоящее время механическая сепарация бытовых отходов является одной из основных предшествующих операций полной утилизации и фактического обезвреживания отходов. Получение тепловой и электрической энергии из ТБО.

Твердые бытовые отходы - это топливо, сопоставимое по теплоте сгорания с торфом и некоторыми марками бурых углей. Оно образуется там, где тепловая и электрическая энергия наиболее востребована, т.е. в крупных городах, и имеет гарантированное предсказуемое возобновление, пока существует человечество.

В последнее время неуклонно наблюдается общий рост выработки энергии из отходов, который прогнозируется и в дальнейшем, при этом доля выработки электроэнергии несколько повышается (рис. 2). Ориентировочные расчеты для ТБО с теплотой сгорания, например, 10 МДж/кг показывают, что общие удельные расходы на строительство завода с увеличением его мощности от 100 до 300 тыс. т ТБО в год, уменьшаются примерно на 25-35%.

За рубежом выручка от продажи вырабатываемой энергии, в первую очередь, зависит от типа и качества продаваемой энергии. Так, например, в Австрии электроэнергия покупается по цене 45 евро/МВт.ч при гарантированном

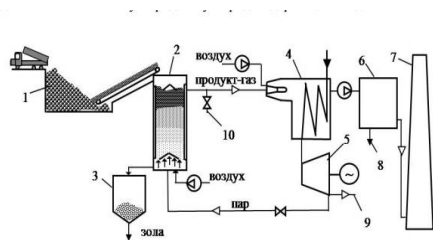
обеспечении ею потребителя, и 25 евро/МВт.ч, если поставка электроэнергии зависит от режима работы поставщика. Тарифы на отпуск тепловой энергии составляют 10 и 6 евро/МВт.ч (11,6 и 7 евро/Гкал) соответственно [2].



**Рис. 1.** Выработка электрической и тепловой энергии в Европе.

В институте проблем химической физики Российской Академии наук разработан эффективный метод термической переработки ТБО с целью выработки тепловой и электрической энергии. Предлагаемая технология термической переработки основана на применении двухстадийной схемы, показанной в общем виде на рис. 3. На первой стадии перерабатываемый материал подвергается паровоздушной газификации в сверхадиабатическом режиме горения. Получаемый при этом энергетический продукт – газ, содержащий водород  $H_2$ , окись углерода  $CO$  и, в ряде случаев, углеводороды и другие органические соединения, сжигается на второй стадии в обычных устройствах (паровых или водогрейных котлах) с получением тепловой и электрической энергии. Газификацию осуществляют в реакторе-газификаторе шахтного типа при реализации сверхадиабатического режима горения в «плотном» слое. Специфической особенностью данного процесса является то, что выделяющееся при горении тепло не выводится из реактора (твёрдые и газообразные продукты выходят из реактора при относительно низких температурах), а концентрируется в зоне газификации и используется для получения водорода из воды и частично окиси углерода из углеродосодержащих соединений.

Перерабатываемое сырьё загружается в реактор сверху через шлюзовую камеру. снизу подаётся воздух и водяной пар. Отбор продукта – газа происходит в верхней части реактора, а выгрузка зольного остатка – в нижней. Продвижение рабочей массы в реакторе происходит под действием собственного веса.



**Рис. 2.** Схема процесса термической переработки отходов с получением тепловой и электрической энергии: 1 – перерабатываемый материал; 2 – реактор-газификатор; 3 – бункер для золы; 4 – котел; 5 – паровая турбина; 6 – фильтр для очистки дымовых газов; 7 – дымовая труба; 8 – удаление осадков газоочистки; 9 – пар потребителям; 10 – отделение жидких продуктов.

По высоте газификатора располагается несколько характерных зон. В самых верхних слоях температура держится в пределах 100 – 200 °С. Здесь происходит подсушка вновь поступившего сырья, продуваемого продукт-газом. В результате продукт-газ до некоторой степени насыщается водяным паром. Ниже располагается зона, где преобладают процессы пиролиза и возгонки. В бескислородной среде происходит термическое разложение и коксование органической смеси.

Здесь продукт-газ обогащается летучими продуктами пиролиза. В средней части реактора располагается зона газификации, где при температурах 1000-1200 °С происходит реакция коксового остатка с кислородом, парами воды и двуокисью углерода с образованием СО и Н<sub>2</sub>. Некоторая часть углерода сгорает полностью с образованием СО<sub>2</sub>, за счёт чего в зоне газификации поддерживается необходимая температура. Ниже находится зона, где твёрдый остаток, состоящий в основном из минеральных соединений, постепенно охлаждается в потоке газифицирующего агента, богатого кислородом. Здесь догорают остатки органических соединений и углерода, а горючие материалы полностью превращаются в золу. В самой нижней части реактора лежит зона окончательного охлаждения твёрдого остатка до температуры около 100 °С.

#### Получение тепловой энергии

Задачей экологически чистой переработки твердых бытовых отходов является экологически чистое сжигание ТБО и других горючих отходов с выработкой тепловой энергии, с минимальным воздействием на окружающую среду, с максимальным КПД, минимальными трудозатратами и максимальным использованием негорю-

чих твердых бытовых отходов и системой утилизации золы.

В бункерном блоке твердые бытовые и промышленные отходы принимают без сортировки как из спецмашин, так и из грузового транспорта общего назначения. Крупногабаритные металлические включения отделяют из отходов на стадии приема, а мелочь – из золы после сжигания отходов. Жидкие горючие и жидкие обводненные отходы принимают в отдельные емкости. Затем отсортированные горючие ТБО равномерно подаются на сжигание в блок сжигания. Для обеспечения высокой эффективности обезвреживания процесс сжигания отходов осуществляют в две стадии:

- озоление в противоточной вращающейся печи;
- дожигание дымовых газов в вихревом дожигателе.

Дымовые газы охлаждают в котле-утилизаторе с получением перегретого пара. Выработываемый пар отдается городским предприятиям, используется для собственных нужд завода в качестве греющего источника для абсорбционных тепловых насосов и подогрева сетевой теплофикационной воды города или обогрева теплиц. Затем дымовые газы поступают в блок дымоочистки, где выполняется мокрая очистка дымовых газов от пыли и вредных примесей.

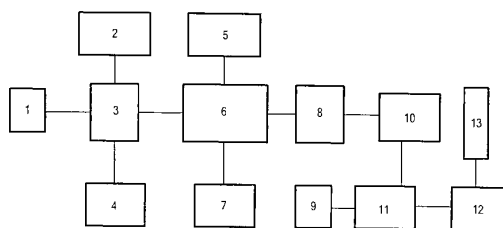
Концентрированные стоки из системы газоочистки и сточные воды от промывки технологического оборудования используются для охлаждения золы с отводом пара в огнетехнический агрегат. Золу и шлам из блока сжигания и блока дымоочистки используют в блоке утилизации золы для производства строительных материалов.

Из переплавляемой золы в систему газоочистки уходят легколетучие компоненты (К, Na, С, Cl, S) и тяжелые металлы (Zn, Cu, Cd, Pb). Здесь же происходит улавливание вторичной пыли с повышенным содержанием тяжелых и цветных металлов (в т.ч. в виде шлама в ЦБА). Масса исходной золы и газов после плавления распределяется в соотношениях: шлак – 60%, вторичная зола от испарения легколетучих веществ и за счет механического уноса – 9,0%, дымовые газы – 29%, металл – 2% [3].

Гранулированный шлак в виде частиц размером до нескольких мм имеет высокую устойчивость к растворению в воде и слабых кислотах. Такой шлак пригоден для строительства дорог и производства строительных материалов.

В целом блок утилизации золы в составе МСЗ обеспечивает переработку в экологически

безопасные продукты до 90% исходной массы золы. Диоксины, содержащиеся в исходной золе, в полученном после плавления шлаке отсутствуют полностью.



**Рис. 3.** Блок-схема блока утилизации золы.

Блок утилизации золы содержит 1 - источник электропитания, 2 - воздушный компрессор, 3 - плазмотрон, 4 - водяной насос, 5 - бункер золы с системой подачи золы, 6 - плавильный реактор, 7 - систему слива расплава и грануляции шлака, 8 - дожигатель отходящих газов, 9 - приемник для зольного остатка, 10 - центробежно-барботажный аппарат, 11 - рукавный фильтр, 12 - дымосос, 13 - трубу.

#### Получение электроэнергии

Возможно несколько вариантов схем комбинирования МСЗ и энергетического оборудования для получения различных энергоносителей. Мусоросжигательные заводы сооружаются как утилизационные котельные (УК), так и ТЭЦ (УТЭЦ):

- Котельная и МСЗ; конечным продуктом является тепловая энергия.
- ТЭЦ со сжиганием ТБО; конечным продуктом является тепловая и электрическая энергия (или только электроэнергия)
  - о ТЭЦ, сжигающие ТБО на базе ПГУ;
  - о ТЭЦ, сжигающие ТБО на базе ГТУ;
  - о ТЭЦ на базе ПГУ, сжигающие совместно с ископаемым топливом ТБО (или топливо из ТБО).

УК оснащаются паровыми котлами-утилизаторами с параметрами пара, как правило, давлением 1,4-2,4 МПа температурой до 250 – 300 °С, при слоевом сжигании топлива на специальных решетках различных систем (в том числе «кипящего» слоя). Иногда котлы-утилизаторы применяются водогрейные.

УТЭЦ оснащены турбогенераторами с турбинами различного назначения:

- теплофикационными для выработки электроэнергии с отбором пара низкого давления и тепла как для собственных нужд МСЗ, так и отдачи внешним потребителям через электрические и тепловые сети городов;
- производственными с отборами пара повы-

шенного давления, обеспечивающие технологические и коммунальные нужды предприятий,

- а также чисто конденсационными, вырабатывающими только электроэнергию.

Для наибольшей наглядности особенности реализации каждой из схем комбинирования, приведем российский и зарубежный опыт применения описанных технологий, а также перспективные разработки в данной области.

На первой стадии твердые отходы превращаются в газообразный горючий продукт-газ, а на второй - полученный газ сжигается в паровом или водогрейном котле. Суммарный коэффициент тепловой мощности составляет примерно 95%. Таким образом, при работе мини-ТЭЦ на отходах можно обеспечить горячей водой и отоплением несколько больших домов. Исходя из этого, располагать установку наиболее рационально следует в том районе города, где есть проблемы с транспортировкой отходов, и имеется потребность в дополнительной тепловой энергии. Один из вариантов - использование установки в порядке модернизации старых угольных ТЭЦ. Перед тем как отходы будут подвергаться сжиганию, они пройдут первичную сортировку и измельчение до требуемых линейных размеров кусков - в пределах 20 на 20 см.

Предлагаемая технология обеспечивает допустимый уровень образования диоксинов. Максимальная температура (1000-1200 градусов) и время горения в зоне газификации гарантируют уничтожение диоксинов. После первой стадии сжигания нет выбросов в атмосферу, так как весь продукт-газ идет в горелку на выработку тепла. Низкие линейные скорости газового потока в реакторе и его фильтрация через слой исходного перерабатываемого материала обеспечивают крайне низкий вынос пылевых частиц с продукт-газом. В результате появляется возможность значительно сократить капитальные затраты на газоочистное и энергетическое оборудование. Таким образом, сжигание в две стадии позволяют резко уменьшить образование диоксинов и обеспечить допустимые нормы.

Что касается образующейся золы, то предлагается технология, позволяющую перерабатывать золу в химически нейтральный, механически достаточно стойкий продукт, который можно использовать даже при строительстве без всяких опасений. Из золы получают керамические шарики, в которых имеется тройная физико-химическая защита поступления тяжелых металлов в окружающую среду. Степень вымываемости тяжелых металлов из таких шариков в

тысячи раз меньше, чем из самой золы. Это переводит золу в безопасное состояние, т.к. простое замешивание в цемент означает просто отсрочку негативных последствий, поскольку цементные блоки недолговечны.

#### Перспективы переработки ТБО

При этом возможных направлений модернизации данной системы управления отходами два:

- 1) создание условий для минимизации образования отходов, т.е. технологическая модернизация экономики на основе наилучших доступных технологий;
- 2) вовлечение отходов, включая накопленные за предыдущие годы объемы, в хозяйственное использование в качестве вторичных материальных и энергетических ресурсов, т.е. развитие в России индустрии утилизации отходов.

Для увеличения рынка вторсырья в развитых зарубежных странах сегодня применяются различные механизмы влияния - требования по обязательному применению вторсырья при выпуске новых товаров (в процентах) и льготное кредитование подобных производств. Также, в европейской системе госзакупок предусматриваются преимущества для таких предприятий и организаций, которые производят или поставляют товары и продукцию, которые производятся из вторичного сырья либо же с использованием вторсырья.

Перспективы использования в РФ твердых бытовых отходов в качестве вторичных энергетических ресурсов связаны с принятием законодательных документов, направленных на существенное сокращение полигонного захоронения, по крайней мере, для крупных городов, и повышение заинтересованности энергетических компаний в развитии возобновляемых источников энергии, а также активном внедрении новых технологий в области переработки.

#### Выводы

Процесс утилизации твёрдых бытовых отходов должен подбираться в каждом отдельном случае учитывая все особенности отходов, местности, их количество.

Сложность решения проблем утилизации бытовых отходов объясняется необходимостью применения сложного капиталоемкого оборудования и отсутствием экономической обоснованности каждого конкретного решения.

Резюмируя все написанное выше, можно с уверенностью заявить, что несмотря на суще-

ствующие технологий рационального использования отходов, основной причиной неэффективной работы по утилизации ТБО является то, что проблемы охраны окружающей среды, использования ресурсов и непрерывного развития системы утилизации мусора до сих пор не являются приоритетными для органов управления в нашей стране.

Остается лишь надеяться на то, что в ближайшее время государством будут сделаны шаги, необходимые для создания новой более экологичной и эффективной системы обращения с ТБО.

#### Список литературы

1. Зайченко В.М. Проблемы развития биоэнергетики в России /Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Жиганов И.Г., Ильин А.А.// Энергетические установки и технологии. 2020 - Т. 6. № 3. С. 30-34.
2. Зайченко В.М. Направления развития энергетики /Чернявский А.А., Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Абейдулин С.А. //Энергетические установки и технологии. 2019 - Т. 5. № 3. С. 53-61.
3. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики Крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.

#### References

1. Zaichenko V. M. Problems of bio-energy development in Russia /Kuvshinov V. V., Kakushina E. G., Zhiganov I. G., Ilyin A. A. / Power installations and technologies. 2020-Vol. 6. No. 3. pp. 30-34.
2. Zaichenko V. M. Directions of energy development / Chernyavsky A. A., Kuvshinov V. V., Kakushina E. G., Abeidulin S. A. //Power plants and technologies. 2019-Vol. 5. No. 3. pp. 53-61.
3. Guryev, V. V., Development of renewable IP-source of electricity in the power system of the Republic of Crimea and Sevastopol / Kaku bus E. G., B. A. Yakimovich, Kuvshinov V. V.//Energy and technology 2019. Vol. 5 No. 2. pp. 90-93.

---

---

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

---

---

УДК 504.062.2

### Проблема утилизации и обезвреживания отходов производства и потребления в Республике Крым

Е.В. Заблוצкая<sup>1</sup>, А.С. Горблянская<sup>2</sup>, Т.Н. Тищенко<sup>3</sup>*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, <sup>1</sup>evere82@mail.ru, <sup>2</sup>gorblyanskaya2710@gmail.com, <sup>3</sup>hikikomori2550@gmail.com*

Статья поступила 22.06.2021 г.; после доработки 24.06.2021 г.

---

#### Аннотация

*В статье представлены результаты анализа сферы обращения с отходами производства и потребления в Республике Крым. Проанализирована деятельность предприятий Крыма занимающихся обезвреживанием и утилизацией отходов производства и потребления. Определены возможные пути решения сложившейся ситуации с отходами производства и потребления в Республике.*

*Ключевые слова:* отходы производства и потребления, накопление отходов, утилизация отходов, обезвреживание отходов, размещение отходов, твёрдые коммунальные отходы.

---

### The problem of utilization and neutralization of production and consumption waste in the Republic of Crimea

E.V. Zablotzskaya<sup>1</sup>, A.S. Gorblyanskaya<sup>2</sup>, T.N. Tishchenko<sup>3</sup>*Sevastopol state university, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia,  
<sup>1</sup>evere82@mail.ru, <sup>2</sup>gorblyanskaya2710@gmail.com, <sup>3</sup>hikikomori2550@gmail.com*

Received 22.06.2021 y.; received in final form 24.06.2021 y.

---

#### Abstract

*The article presents the results of the analysis of the sphere of waste management of production and consumption in the Republic of Crimea. The article analyzes the activities of Crimean enterprises engaged in the neutralization and disposal of industrial and consumer waste. Possible ways of solving the current situation with production and consumption waste in the Republic are identified.*

*Keywords:* production and consumption waste, waste accumulation, waste disposal, waste disposal, waste disposal, solid municipal waste.

---

#### Введение

В настоящее время проблема накопления отходов, включая отходы производства и потребления, является одной из основных угроз экологической безопасности Российской Федерации в целом и Республики Крым в частности. Объём образования отходов неуклонно растёт, растёт количество несанкционированных свалок, и с учетом специфики Республики Крым как рекреационно-курортного региона проблема

безопасного обращения с отходами стала приоритетной с точки зрения социально-экономического развития в среднесрочной и долгосрочной перспективе. Захоронение твёрдых коммунальных отходов в смешанном виде на полигонах, привело к функционированию в Республике Крым 12 объектов захоронения (из них только 4 включены в Государственный реестр объектов размещения отходов: в с. Тургенево Белогорского района, г. Армянск, пгт Черноморское, г.

Джанкой) [1]. Согласно официальной статистике в Республике Крым по состоянию на 1 января 2014 года накоплено 55,1 миллионов тонн отходов различных классов опасности. К накоплению отходов привело отсутствие технологий по их переработке и отсутствие средств на внедрение существующих технологий [2].

Актуальность исследования заключается в том, что ряд отходов запрещается вывозить на полигоны. Часть таких отходов требуется утилизировать, другие обезвредить.

### Постановка задачи

Целью работы являлся анализ сферы обращения с отходами производства и потребления в Республике Крым.

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

- проанализировать деятельность предприятий Крыма занимающихся обезвреживанием и утилизацией отходов производства и потребления;
- рассмотреть возможные пути решения сложившейся ситуации с отходами производства и потребления в Республике.

### Описание исследования

По результатам систематизированных данных, представленных субъектами хозяйствования за 2019 год, в Республике Крым образовалось – 9 564 200,332 тонны отходов производства и потребления [3], в том числе:

- I класса опасности – 471,41 тонны;
- II класса опасности – 189,99 тонны;
- III класса опасности – 5 557,46 тонны;
- IV класса опасности – 790 635,54 тонны;
- V класса опасности – 8 767 345,92 тонны [1].

Основная доля образующихся в республике отходов приходится на отходы IV-V классов опасности и составляет 91,41% от общего количества образующихся отходов производства и потребления.

В разрезе видов экономической деятельности основной вклад в объемы образования отходов осуществляют предприятия:

- строительства – 69,69% от общего объема образования;
- торговли – 15,67% от общего объема образования;
- предоставления образовательных услуг – 1,87% от общего объема образования;
- добычи полезных ископаемых – 0,78% от

общего объема образования.

Основными крупными промышленными предприятиями на территории Республики Крым, эксплуатирующими объекты размещения промышленных отходов, являются: ПАО «Крымский содовый завод», АО «Бром», Армянский Филиал ООО «Титановые Инвестиции», ГУП Республики Крым «Черноморнефтегаз», Филиал ООО «Краснодарский металлургический комплекс» в г. Керчь.

В Государственный реестр объектов размещения отходов включены следующие объекты:

- свалка для складирования выбуренной породы (шламосборник) ГУПРК «Черноморнефтегаз» (пр. Кирова, 52, г. Симферополь, Республика Крым);
- кислотонакопитель, фосфогипсохранилище-1, фосфогипсохранилище-2, отвал сухого фосфогипса, огарконакопитель, полигон для складирования и захоронения промышленных отходов и мусора ООО «Титановые Инвестиции» (ул. Северная промзона, г. Армянск, Республика Крым);
- накопитель-испаритель промстоков ПАО «Крымский содовый завод» (ул. Проектная, д. 1, г. Красноперекоск) [1].

В соответствии с требованиями распоряжения Правительства Российской Федерации от 25.01.2018 г. №84-р принята «Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» установлены целевые показатели по утилизации твёрдых коммунальных и отходов производства.

Стратегия подразумевает достижения к 2030 году показателя утилизации ТКО в размере 80% от объема образующихся ТКО в Российской Федерации и 86% по доли утилизированных и обезвреженных отходов в общем объеме образованных отходов. Стратегия также предусматривает развитие в Российской Федерации инфраструктуры по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов на территории экотехнопарков [4].

Анализ данных о количествах образованных, утилизированных и обезвреженных отходов в период с 2016 по 2018 гг. (согласно данным федерального статистического наблюдения № 2-ТП (отходы)) показывает, что объемы утилизации и обезвреживания стабильно находятся на невысоком уровне.

Это связано с тем, что основным методом обращения с отходами на территории Респуб-

лики традиционно является размещение отходов.

Средний процент утилизации и обезвреживания за рассмотренный период составил 15,5% (от 10 до 20% в различные годы). На конец 2018 года процентная доля утилизации и обезвреживания отходов составила 20%. Количественные данные о балансовых потоках образования, утилизации, обезвреживания, по классам опасности

представлены в таблице 1.

В Республике регулярно образуется ряд отходов, требующих выработки отдельных решений по их обращению. Как правило, это отходы производства и потребления, образующиеся от организаций и предприятий в процессе осуществления хозяйственной деятельности.

**Таблица 1.** Данные динамики изменения образованных, утилизированных и обезвреженных отходов в период 2016-2018 гг.

| Наименование класса опасности              | Единица измерения                                           | Образовано отходов, по годам                         |               |               |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|---------------|---------------|
|                                            |                                                             | 2016                                                 | 2017          | 2018          |
| <b>Всего отходов I-V классов опасности</b> | т                                                           | 2282<br>686,1                                        | 3682<br>805,1 | 80513<br>70,2 |
|                                            | % от количества образованных отходов                        | 100,0<br>0%                                          | 100,0<br>0%   | 100,0<br>0%   |
| <b>I класс опасности</b>                   | т                                                           | 264,7                                                | 1054,3        | 31,7          |
|                                            | % от общего количества образованных отходов                 | 0,01<br>%                                            | 0,03<br>%     | 0,00%         |
| <b>II класс опасности</b>                  | т                                                           | 224,6                                                | 449,5         | 125,0         |
|                                            | % от общего количества образованных отходов                 | 0,01<br>%                                            | 0,01<br>%     | 0,00%         |
| <b>III класс опасности</b>                 | т                                                           | 9479<br>4,6                                          | 2598<br>9,6   | 52352<br>,6   |
|                                            | % от общего количества образованных отходов                 | 4,15<br>%                                            | 0,71<br>%     | 0,65%         |
| <b>IV класс опасности</b>                  | т                                                           | 4718<br>05,9                                         | 1117<br>576,7 | 50228<br>5,7  |
|                                            | % от общего количества образованных отходов                 | 20,67<br>%                                           | 30,35<br>%    | 6,24%         |
| <b>V класс опасности</b>                   | т                                                           | 1715<br>596,3                                        | 2537<br>735,2 | 74965<br>75,2 |
|                                            | % от общего количества образованных отходов                 | 75,16<br>%                                           | 68,91<br>%    | 93,11<br>%    |
| <b>Справочно: I-IV классы опасности</b>    | т                                                           | 5670<br>89,7                                         | 1145<br>070,0 | 55479<br>5,0  |
|                                            | % от общего количества образованных отходов                 | 24,84<br>%                                           | 31,09<br>%    | 6,89%         |
|                                            |                                                             | <b>Утилизировано и обезврежено отходов, по годам</b> |               |               |
|                                            |                                                             | <b>2016</b>                                          | <b>2017</b>   | <b>2018</b>   |
| <b>Всего отходов I-V классов опасности</b> | т                                                           | 2296<br>47,6                                         | 6096<br>92,0  | 15955<br>07,6 |
|                                            | % от общего количества образованных отходов                 | 10,06<br>%                                           | 16,56<br>%    | 19,82<br>%    |
| <b>Справочно: I-IV классы опасности</b>    | т                                                           | 1062<br>07,3                                         | 1400<br>67,1  | 11179<br>6,9  |
|                                            | % от количества образованных отходов I-IV классов опасности | 18,73<br>%                                           | 12,23<br>%    | 20,15<br>%    |

Для этих отходов характерны:

1. значительный объём образования схожих по видам отходов;
2. постоянность и относительная стабильность объёмов образования;
3. необходимость обращения с данными видами отходов отдельно от других видов.

Примером таких отходов являются лампы

ртутные, ртутно-кварцевые, люминесцентные, утратившие потребительские свойства. В связи с нарастающим распространением применения энергосберегающих ламп (использование энергосберегающих ламп обусловлено политикой энергосбережения в рамках реализации Федерального закона от 23.11.2009 № 261-ФЗ "Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации") их количество в жилых домах значительно выросло.

В зависимости от технологии и типа в каждой люминесцентной или специальной ртутной лампе, используемой в нашей стране, содержится от 20 до 300 мг ртути, в наиболее распространённых типах – от 60 до 120 мг, а в некоторых лампах ее количество достигает 350–560 мг. Ртутьсодержащие лампы представляют особую опасность с позиций локального загрязнения среды обитания токсичной ртутью. Так, скорость испарения металлической ртути в спокойном воздухе при температуре окружающей среды 20 °С составляет 0,002 мг с 1 см<sup>2</sup> в час, а при 35–40 °С на солнечном свете увеличивается в 15–18 раз и может достигать 0,036 мг/см<sup>2</sup> в час. При разбивании ртутной лампы, содержащей 80 мг металла, образуется свыше 11 тыс. шариков ртути диаметром 0,01 см с общей суммарной поверхностью 3,53 см<sup>2</sup>. Этого количества ртути, при условии ее полного испарения, достаточно для того, чтобы загрязнить до уровня ПДК помещение объемом в 300000 м<sup>3</sup>.

Постановлением Правительства Российской Федерации от 28 декабря 2020 № 2314 утверждены «Правила обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде». Данные правила обязательны для юридических лиц (независимо от организационно-правовой формы) и индивидуальных предпринимателей, в том числе осуществляющих управление многоквартирными жилыми домами, а также для физических лиц.

Согласно данным правилам:

1. накопление отработанных ртутьсодержащих ламп должно производиться отдельно от других видов отходов;
2. не допускается самостоятельное обезвреживание, использование, транспортирование и

размещение отработанных ртутьсодержащих ламп потребителями отработанных ртутьсодержащих ламп, а также их накопление в местах, являющихся общим имуществом собственников помещений многоквартирного дома;

3. потребители ртутьсодержащих ламп (кроме физических лиц) для накопления повреждённых отработанных ртутьсодержащих ламп обязаны использовать специальную тару;
4. органы местного самоуправления организуют сбор отработанных ртутьсодержащих ламп и информирование юридических лиц, индивидуальных предпринимателей и физических лиц о порядке осуществления такого сбора;
5. транспортирование отработанных ртутьсодержащих ламп осуществляется в соответствии с требованиями правил перевозки опасных грузов;
6. размещение отработанных ртутьсодержащих ламп не может осуществляться путем захоронения;
7. обезвреживание отработанных ртутьсодержащих ламп осуществляется специализированными организациями, осуществляющими их переработку методами, обеспечивающими выполнение санитарно-гигиенических, экологических и иных требований [5].

Во избежание отравления парами ртути из разбитых ламп и приборов, содержащих металлическую ртуть, рекомендуется хранить их в упаковке в приспособленном для этих целей месте. Запрещается допускать бой, демонтаж, выброс в производственный и бытовой мусор и вывоз на свалку ртутьсодержащих ламп и приборов.

Только санкционированное уничтожение ламп, то есть проведенное по специальным технологическим режимам, в специальном помещении, на специальном оборудовании, позволяет многократно снизить вредное воздействие на окружающую среду и, следовательно, избавить от опасности ртутного отравления.

Решение вопросов сбора ртутьсодержащих отходов относится к компетенции управляющих организаций и администрации поселений.

Сбор ртутьсодержащих отходов (использованных люминесцентных ламп, ртутьсодержащих приборов) осуществляется в специальную тару в местах, исключающих проникновение посторонних лиц, для накопления транспортных

партий и последующей передачи специализированным предприятиям для обезвреживания.

Основным методом обращения с ртутьсодержащими лампами является их обезвреживание, самым распространенным методом обезвреживания является их демеркуризация (извлечение ртути с разделением на неопасные составляющие).

Создание эффективной схемы обращения с

**Таблица 2.** Сведения о предприятиях, осуществляющих утилизацию и обезвреживание отходов I-IV классов опасности

| № п/п | Наименование организации      | Утилизация | Обезвреживание | Класс опасности отходов | Адреса мест осуществления деятельности организации                                                                                                                                                                                                                          |
|-------|-------------------------------|------------|----------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1.    | ООО «ЭКОСЕРВИС-ГРУПП»         | +          | +              | I-IV                    | Бахчисарайский район, с. Глубокий Яр, ул. 50 лет ВЛК СМ, строение 70 Г                                                                                                                                                                                                      |
| 2.    | ООО "Фирма Вагант-2"          | +          | +              | I-IV                    | г. Ялта, ул. Дарсановская, промзона, северная сторона, 298400, г. Бахчисарай, ул. Промышленная, 24; г. Севастополь, ул. Кизиловская, 24                                                                                                                                     |
| 3.    | ООО "Фирма Вагант2"           | +          | -              | IV                      | г. Ялта, ул. Дарсановская, промзона, северная сторона                                                                                                                                                                                                                       |
| 4.    | ООО "ЭкоКрымСервис"           | +          | -              | III-IV                  | г. Симферополь, ул. Километр Московского шоссе 9, Помещение № 1, Лит. «М», Помещение №1,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14, Лит. «Ю»                                                                                                                                                  |
| 5.    | ООО "КрымЭкогидротех"         | +          | +              | I-IV                    | г. Керчь, ул. Красная горка, 1                                                                                                                                                                                                                                              |
| 6.    | ООО "Экосистема Крыма"        | -          | +              | III-IV                  | г. Керчь, ул. 1й Пятилетки 38а; г. Керчь, ул. Целимберная, д.8; Акватория внешнего и внутреннего рейдов портов «Керчь», «Кавказ», «Тамань», «Темрюк», включая якорные стоянки № 450,451,453, 454, 455; РПР участок № 2, участок № 3                                         |
| 7.    | ООО "Экосистема Крыма"        | +          | +              | I-IV                    | г. Керчь, ул. 1й Пятилетки 38а; Республика Крым, Ленинский район, с. Горностаевка, ул. Фонтановская, 1; Акватория внешнего и внутреннего рейдов портов «Керчь», «Кавказ», «Тамань», «Темрюк», включая якорные стоянки № 450,451,453, 454, 455; РПР участок № 2, участок № 3 |
| 8.    | ООО "КРЫМШИИПЕРЕРАБОТКА"      | +          | -              | IV                      | г. Керчь, ул. Индустриальное шоссе, д. 15-А, помещение 1                                                                                                                                                                                                                    |
| 9.    | ООО "Южный город Севастополя" | +          | +              | I-IV                    | г. Севастополь, ул. Чернореченская, 133                                                                                                                                                                                                                                     |
| 10.   | ООО "Чистый город"            | -          | +              | III-IV                  | г. Симферополь, ул. Узловая, д. 20                                                                                                                                                                                                                                          |
| 11.   | ООО "МедВейстКрым"            | -          | +              | II-IV                   | г. Симферополь, 9-ый км Московского шоссе, литер Я                                                                                                                                                                                                                          |
| 12.   | ООО "Экопромкрошка"           | +          | -              | IV                      | г. Севастополь, г. Инкерман, Симферопольское шоссе, д. 16                                                                                                                                                                                                                   |
| 13.   | ООО "БиоПартнер"              | +          | +              | I-IV                    | г. Симферополь, ул. Внешняя, г. Керчь, Вокзальное шоссе, д. 44; г. Севастополь, ул. Песочная, д. 17                                                                                                                                                                         |
| 14.   | ООО "Рабберэкосервис"         | +          | -              | IV                      | г. Евпатория Черноморское шоссе, д.24                                                                                                                                                                                                                                       |
| 15.   | ООО "КрымЭкоТехСервис"        | +          | +              | I-IV                    | г. Севастополь, 15 км автодороги Р-27 Севастополь-Инкерман, д.1                                                                                                                                                                                                             |
| 16.   | ООО "КП Чистый город"         | -          | +              | III-IV                  | г. Севастополь, ул. Черниговская, 5                                                                                                                                                                                                                                         |
| 17.   | ООО "Грин-Крым"               | +          | +              | I-IV                    | РК, Симферопольский район, с. Перово, ул. Хачирашвили д.35/18                                                                                                                                                                                                               |

ртутьсодержащими отходами – важная задача для поддержания экологической безопасности.

На сегодняшний день в Республике Крым действует ряд предприятий, осуществляющих утилизацию и обезвреживание отходов I-IV классов опасности. Сведения о данных предприятиях представлены в таблице 2.

|     |                           |   |   |        |                                                                                                                                         |
|-----|---------------------------|---|---|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 18. | ООО "МеталлЭкспорт"       | + | - | III-IV | г. Севастополь (Инкерман), ул. Симферопольское шоссе, д. 16                                                                             |
| 19. | ООО "Экопром Крым"        | + | - | IV     | г. Симферополь в районе ул. Жени Дерюгинной и ул. Кубанской земельный участок с кадастровым номером 90:22:010215:4112                   |
| 20. | ООО "КП КрымЭкоТехСервис" | + | + | II-IV  | г. Севастополь, ул. Отрадная, д. 21                                                                                                     |
| 21. | ООО "Боспорэкосервис"     | + | + | I-IV   | г. Щелкино, территория бывшей Крымской АЭС, участок 34; г. Феодосия, Ближние Камыши, ул. Дружбы, 109 Б; г. Керчь, Аршинцевская коса, 43 |
| 22. | ООО "ПЕСОК"               | + | - | IV     | г. Евпатория, в северной части города (участок 2)                                                                                       |
| 23. | ООО "Фаворит 92"          | - | + | IV     | РК, Бахчисарайский район, с. Залесное, ул. Советская, д. 12                                                                             |
| 24. | ООО "ОМР Капитал"         | + | + | III-IV | Республика Крым, Сакский район, за границами села Михайловка, ул. Проезжая, д. 1                                                        |

Дуальная схема предусматривает накопление ТКО в контейнеры двух видов: 1 – для накопления мокрой фракции неутильной, 2 – сухая, для накопления картона, пластика, стекла и пр. Крупногабаритные отходы накапливаются населением отдельно в контейнерах/бункерах.

Согласно морфологическому составу твёрдых коммунальных отходов, определённому в рамках разработки генеральной схемы санитарной очистки территории Республики Крым в 2015 г. (таблица 3), доля вторичных материальных ресурсов, то есть доля «сухой» фракции, составляет 29,6%. Соответственно, неутильная фракция «мокрая» в массе твёрдых коммунальных отходов составляет 70,4% [2].

**Таблица 3.** Результаты исследований морфологического состава ТКО на территории Республики Крым, по данным 2015 года

| Наименование компонента | Доля компонента в общей объеме ТКО (по массе), % |
|-------------------------|--------------------------------------------------|
| Бумага                  | 6,7                                              |
| Стекло                  | 12,3                                             |
| Чёрный металл           | 1,2                                              |
| Цветной металл          | 0,2                                              |
| Пленка                  | 5,5                                              |
| ПЭТ-упаковка            | 1,9                                              |
| Пластик                 | 1,7                                              |
| Электропровода          | 0,1                                              |
| <b>Всего:</b>           | <b>29,6</b>                                      |

Для реализации дуальной схем раздельного накопления ТКО сухой фракции понадобится 11 251 контейнеров (при условии объёма 1,1 м³), для накопления мокрой фракции – 26 567 контейнеров аналогичного объёма, что суммарно

составляет 37 818 контейнеров.

Таким образом, планируемая схема обращения с ТКО позволит решить существующие задачи в отрасли, избежать изъятия из хозяйственного оборота дополнительных земель и совокупно свести к минимуму негативное воздействие на окружающую среду.

## Заключение

1. Одной из нерешенных задач на федеральном и региональном уровнях является создание инновационной, технико-экономической системы, позволяющей минимизировать количество захораниваемых отходов, максимально обеспечив при этом ресурсосбережение, повторное вовлечение в хозяйственный оборот утилизируемых компонентов отходов в качестве сырья, материалов, изделий, превращение отходов во вторичное сырьё для изготовления новой продукции и получения энергии.

2. Основной целью развития систем обращения с отходами на предприятиях-природопользователях должно стать максимальное использование ресурсного потенциала отходов, то есть ориентированность на использование отходов в собственных или других технологических процессах и их переработка во вторичное сырьё и вторичную продукцию. Также ввиду активного развития региона должна развиваться система обращения с твёрдыми коммунальными отходами.

3. Для решения проблемы отходов производства и потребления в Республике Крым запланировано строительство девяти мусороперегрузочных станций с элементами сортировки и трёх экотехнопарков, включающих комплекс со-

оружений по обработке, утилизации захоронению отходов. Также предполагается ввести дуальную схему раздельного накопления твёрдых коммунальных отходов.

### Список литературы

1. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2019 году, 2020 – 360 с.
2. Постановление Совета министров Республики Крым от 29.06.2020 № 375 "Об утверждении территориальной схемы в области обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, в Республике Крым" // "Официальный интернет-портал правовой информации" (<http://publication.pravo.gov.ru>) 18 января 2017 года.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2019 году». – М.: Минприроды России; МГУ имени М.В. Ломоносова, – 2020. – 1000 с.
4. Распоряжение Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-р «Об утверждении Стратегии развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 года» // Собрание законодательства Российской Федерации от 5 февраля 2018 г. № 6 ст. 920.
5. Постановление Правительства РФ от 28.12.2020 № 2314 "Об утверждении Правил обращения с отходами производства и потребления в части осветительных устройств, электрических ламп, ненадлежащие сбор, накопление, использование, обезвреживание, транспортирование и размещение которых может повлечь причинение вреда жизни, здоровью граждан, вреда животным, растениям и окружающей среде" // Собрание законодательства Российской Федерации от 4 января 2021 г. № 1 (часть II) ст. 167.
6. Постановление Совета министров Республики Крым от 13.11.2017 № 591 "Об утверждении Порядка сбора твердых коммунальных отходов (в том числе их раздельного сбора) на территории Республики Крым" // "Официальный интернет-портал правовой информации" (<http://pravo.gov.ru>) 27 ноября 2017 года.

January 18, 2017.

3. State report "On the state and protection of the environment of the Russian Federation in 2019". – Moscow: Ministry of Natural Resources of Russia; Lomonosov Moscow State University, – 2020. – 1000 p.
4. Order of the Government of the Russian Federation of 25.01.2018 No. 84-r "On approval of the Strategy for the development of industry for processing, recycling and neutralization of production and consumption waste for the period up to 2030" // Collection of Legislation of the Russian Federation of February 5, 2018 № 6, article 920.
5. Resolution of the Government of the Russian Federation of 28.12.2020 № 2314 "On approval of the Rules for handling production and consumption waste in terms of lighting devices, electric lamps, improper collection, accumulation, use, neutralization, transportation and placement of which may cause harm to life, health of citizens, harm to animals, plants and the environment" // Collection of Legislation of the Russian Federation of January 4, 2021 № 1 (Part II) Article 167.
6. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Crimea of 13.11.2017 № 591 "On approval of the Procedure for collecting solid municipal waste (including their separate collection) on the territory of the Republic of Crimea" // "Official Internet portal of legal information" (<http://pravo.gov.ru>) on November 27, 2017.

### References

1. Report on the state and protection of the environment in the territory of the Republic of Crimea in 2019, 2020 – 360 p.
2. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Crimea of 29.06.2020 No. 375 "On approval of the territorial scheme in the field of waste management, including solid municipal waste, in the Republic of Crimea" // "Official Internet portal of legal information" (<http://publication.pravo.gov.ru>) on

УДК 504.455

## Возможность использования карьерных вод в качестве источников питьевого водоснабжения г. Севастополя

Г.В. Кучерик, В.Д. Гричаная, Ю.А. Омельчук, Д.М. Сытников  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, Galina\_kucherik@mail.ru

Статья поступила 27.08.2021 г.; после доработки 31.08.2021 г.

### Аннотация

В работе исследованы условия формирования гидрологического и гидрохимического состава карьерных вод региона Севастополя. Представлены результаты изучения токсичности вод обводненных карьеров и выводы касательно возможности использования данных вод для централизованного водоснабжения. В качестве тест-объектов использованы микроводоросли (*Chlorella vulgaris* Beijer) и ракообразные *Daphnia* (*Daphnia magna* Straus). Определено, что все источники, из которых были взяты пробы воды, не оказывают острое токсическое действие на живые организмы. Анализ экспериментов и современного состояния водоемов позволил сделать вывод о возможности использования вод Кадыковского карьера при условии 3-кратного разбавления.

**Ключевые слова:** биотестирование, дафнии, Гасфортовское озеро, Инкерманский обводненный карьер, Кадыковский обводненный карьер, оценка токсичности, хлорелла.

## Possibility of using quarry water as a source of drinking water supply for the city of Sevastopol

G.V. Kucherik, V.D. Grichanaya, Yu.A. Omelchuk, D.M. Sytnikov  
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
Galina\_kucherik@mail.ru

Received 27.08.2021 y.; received in final form 31.08.2021 y.

### Abstract

The paper investigates the conditions for the formation of the hydrological and hydrochemical composition of the open pit waters of the Sevastopol region. The results of studying the toxicity of water from flooded quarries and conclusions regarding the possibility of using these waters for centralized water supply are presented. Microalgae (*Chlorella vulgaris* Beijer) and crustaceans *Daphnia* (*Daphnia magna* Straus) were used as test objects. It was determined that all sources from which water samples were taken do not have an acute toxic effect on living organisms. The analysis of experiments and the current state of water bodies made it possible to draw a conclusion about the possibility of using the waters of the Kadykovsky quarry, subject to 3-fold dilution.

**Keywords:** biotesting, daphnia, Gasfortovskoe lake, Inkerman flooded quarry, Kadykovsky flooded quarry, toxicity assessment, chlorella.

### Введение

Для Севастополя, как и для любого другого города, система водоснабжения является важной частью инженерной инфраструктуры населенных пунктов. Без воды трудно представить нормальную работу промышленных предприя-

тий и комфорт населения.

В 2020 году ситуация с водоснабжением в Севастополе стала критической. Малое количество осадков и малоснежная зима привела к засухе [1].

В конце августа власти Севастополя сообщили, что в Чернореченском водохранилище,

которое обеспечивает город водой, осталось 22 млн. 500 тысяч кубометров воды, что составляет примерно третью часть от общего объема [2].

В октябре 2020 г. был объявлен режим повышенной готовности из-за дефицита воды, а глава правительства Севастополя Михаил Развожаев сообщил, что воды городу хватит еще на три месяца [3].

В качестве локальных мер, направленных на поддержание водного режима города и предупреждения возникновения ЧС, было принято решение осуществить отбор части воды из Гасфортского шламохранилища в объеме 3,5 – 4 млн. м<sup>3</sup> воды по руслу реки Сухая в реку Черная, а также ежедневно отбирать воду из затопленного Инкерманского карьера в районе железнодорожного моста в объеме около 300 – 500 тыс. м<sup>3</sup>. Предусматривалось, что вода должна быть дополнительно обработана на гидроузле № 3 по действующей технологии до уровня питьевого качества. Ориентировочный суточный забор воды из Гасфортского шламохранили-



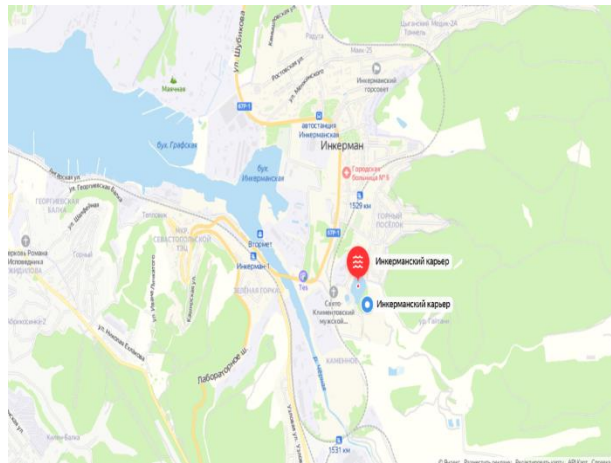
а)

ща планировался в пределах 10 тыс. м<sup>3</sup>. и 5 тыс. м<sup>3</sup> из Инкерманского карьера, т.е. около 15 тыс. м<sup>3</sup>, что позволило бы сократить расход воды из Чернореченского водохранилища [4].

Первым объектом, включенным в систему водоснабжения, стало *озеро святого Климента в Инкерманском карьере*. По подсчетам, из озера в городскую систему водоснабжения можно было забрать около одного миллиона кубометров воды.

Инкерманский известково-ракушечный карьер сталинской железной дороги начали разрабатывать в мае 1944 года для добычи строительных материалов для восстановления народно-хозяйственных объектов Крыма, в первую очередь Севастополя.

В 1978 году после проведения взрывных работ карьер начал заполняться грунтовыми водами, при этом пересох источник Святого Климента, находящийся на территории Инкерманского пещерного Свято-Климентовского монастыря (рис. 1, а, б).



б)

Рис. 1. Инкерманский карьер

Озеро очень глубокое, несмотря на невозможность назвать точные цифры ввиду его особенностей, неровностей дна. Глубина образовавшегося карьерного водоема доходит до 60 метров, площадь водного зеркала около 23 тысяч квадратных метров, уровень воды всегда постоянный.

Воду из водоема в бывшем Инкерманском карьере начали забирать в конце ноября 2020 года. Ежедневный забор составил около 5000 кубометров воды [4].

В целом планировалось забрать миллион кубометров воды из этого резервуара. В начале декабря власти Севастополя сообщили, что за неделю из озера удалось выкачать около 80 тысяч кубов воды.

Предполагалось, что водоем пополняется за

счет подземных источников, поэтому после забора воды ее объемы восполнятся благодаря природным процессам.

Водозабор проработал около месяца (меньше ожидаемого срока), и вынужденно прекратили водозабор из озера в бывшем известняковом карьере [5]. Водозаборные сооружения на берегу озера демонтировали.

*Водоем у горы Гасфорта* (Черноречье, Балаклава, Севастополь, Крым, Россия) образовался путем заполнения бывшего карьера флюсовых известняков поверхностным и подземным стоком в 1977 году. Когда выработка достигла уровня подземных вод, вскрылись горные ключи, и карьер заполнился водой, в результате чего появилось небольшое озеро, которое стало местной достопримечательностью.

Взаимодействие с коллекторно-речной сетью отсутствует. Статус водоема, в соответствии с классификацией Водного кодекса Российской Федерации, – шламохранилище (рис. 2. а, б).

Пруд имеет следующие характеристики: площадь зеркала – 35 га, объем – 2450 тыс. м<sup>3</sup>, назначение – рекреация, находится на территории бывшего Балаклавского рудоуправления. Глубина Гасфортского озера – до 10 метров.

За счет того, что основанием водоема стала горная выработка, а складывали ее известняки, вода в нем очень чистая и прозрачная. Она фильтруется через пористую породу, попутно очищаясь от примесей.

Трубы, загруженные в карьер, "врезаны" в систему, что обеспечивало передачу ресурса в различных направлениях для третьей гидроэлектростанции полуострова.

Предполагалось, что существенных повреждений водохранилища не будет и поэтому его можно будет сохранить в рекреационных целях для проведения соревнований по водным видам

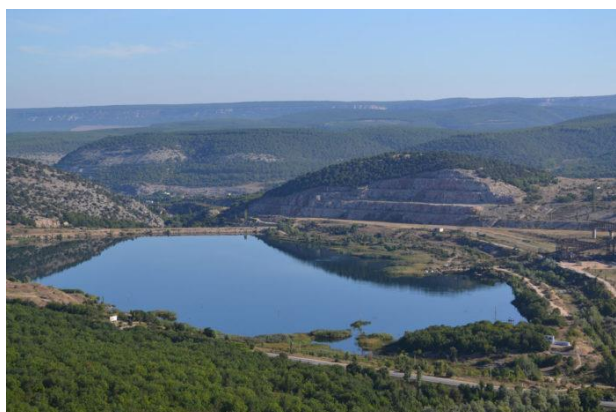
спорта. С этой целью ученые СевГУ построили контрольный буй.

В феврале 2021 г. Севастополь прекратил забор воды из Инкермана и озера у горы Гасфорта, поскольку запасы Чернореченского водохранилища восстановились после выпавших осадков.

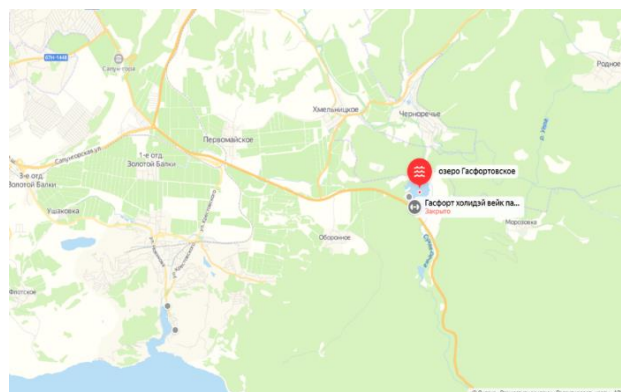
По данным департамента городского хозяйства, за это время из озера у Гасфорты забрали более 292 тысяч кубометров [6].

*Кадыковский карьер* представляет собой многоступенчатое образование с увеличивающимися по мере достижения водного зеркала уступами шириной от 15 до 36 м. Карьер расположен на ул. Новикова, Балаклавский округ, Севастополь, Крым (рисунк. 3, а, б).

Форма карьера близка к овалу с наибольшим диаметром (1,69 км) с запада на восток. Меньший диаметр, ориентированный с севера на юг, составляет 0,76 км. Диаметры по глади озера соответственно – 854,34 и 251,43 м.



а)

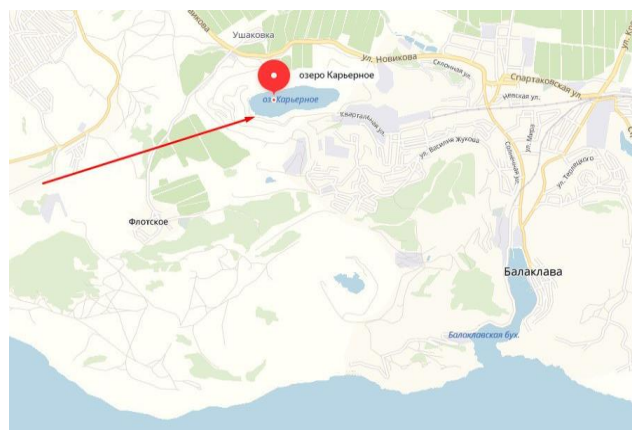


б)

Рис. 2. Озеро Гасфортское



а)



б)

Рис. 3. Кадыковский карьер

Глубина карьера Кадыковского озера составляет более 40 метров, и, по последним данным, в свое время была зафиксирована глубина 44 метра. В нем более 5 миллионов кубометров воды, а озеро пополняется подземными источниками.

Карьер как место добычи полезных ископаемых был интересен в течение нескольких десятилетий в прошлом веке. В нем добывали особый известняк, необходимый для производства ферросплавов (ценное сырье, востребованное металлургической промышленностью). Причиной затопления Кадыковского карьера явилось затопление грунтовыми водами.

Содержание меди, свинца, цинка и марганца в воде значительно ниже допустимых норм. Об этом свидетельствуют лабораторные испытания, трижды взятые в 2020 году [7].

Добыча воды из карьера производится сегодня с использованием уникальной технологии – это понтонная станция, с установленными шестью насосами [8]. Благодаря рассчитанной стратегии новый источник Севастопольской воды может значительно сэкономить запасы Чернореченского водохранилища [9].

### Постановка задачи

Цель данной работы состояла в оценке качества вод карьеров региона Севастополя, а также возможности использования этих вод в качестве источников хозяйственно-питьевого водоснабжения.

Объектом исследования послужило качество карьерных вод региона Севастополя.

Предмет исследований – оценка качества воды методом биотестирования.

Для достижения указанной цели были поставлены задачи исследования:

- изучить общую характеристику карьеров региона Севастополя и условий формирования гидрологического и гидрохимического состава карьерных вод;
- провести отбор проб и серии экспериментов по оценке качества вод карьеров методом биотестирования;
- проанализировать полученные результаты и экологические последствия использования карьерных вод для водоснабжения г. Севастополя.

Все основные этапы биотестирования были автоматизированы с помощью оборудования лаборатории «Биотестирования вод» СевГУ. В комплект оборудования входит: климатостат, для поддержания оптимальных условий содер-

жания дафний; культиватор водоросли KB-05, предназначенный для наращивания маточной культуры водоросли хлорелла; культиватор KBM-05 – для экспонирования проб внутри эксперимента, определитель плотности суспензии.

### Методика проведения эксперимента

Токсичность в водной токсикологии относится к общим характеристикам качества воды, которые обусловлены наличием токсичных загрязнителей в водной биоте. Токсичность воды может быть определена химическими и биологическими методами, используемыми государственной службой мониторинга и контроля качества воды. Метод биотестирования является биологическим, близким к методу химического анализа воды. В то же время, в отличие от химических методов, он позволяет реально оценить токсичность воды или других сред из-за присутствия загрязненных химических веществ и их метаболитовых комплексов. Выполнение биотестирования, по сравнению с аналитическим контролем, более экономично и позволяет ответить на вопрос о комплексной токсичности воды в более короткие сроки.

Биотестирование проводится с использованием как минимум двух объектов из разных систематических групп. Конечный результат принимается как значение, обнаруженное при исследовании объекта, который показал более высокую чувствительность. При выполнении исследований в качестве тест-объектов использовали рачки дафний (*Daphnia magna Straus*) и микроводоросли (*Chlorella vulgaris Beijer*). Для оценки экспериментальных результатов были использованы математические методы обработки данных.

Пробы воды отбирали согласно методикам [10, 11]. Акт отбора проб приведен в табл. 1. Для биотестирования использовалась альгологически чистая культура водорослей *Chlorella vulgaris Beijer*, которая находится на стадии экспоненциального роста. Для оценки токсичности использовалась методика измерений оптической плотности культуры водорослей *Chlorella vulgaris Beijer* для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. Тестовую культуру водорослей вносили по 2 см<sup>3</sup> в 6 стаканов и 48 см<sup>3</sup> контрольной и тестируемой образцов воды.

Таблица 1 Акт отбора проб воды из обводненных карьеров

|   |                                          | Инкерманский<br>обводненный карьер                 | Шламохранилище у горы<br>Гасфорта                  | Кадыковский<br>обводненный карьер [12]             |
|---|------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 1 | Дата и время отбора                      | 19.04.2021 г., 12 ч                                | 27.04.2021 г., 12 ч                                | 25.10.2020 г., 16 ч                                |
| 2 | Цель пробоотбора                         | определение токсичности<br>методом биотестирования | определение токсичности<br>методом биотестирования | определение токсичности<br>методом биотестирования |
| 3 | Место отбора                             | Инкерманский карьер                                | озеро Гасфорта                                     | Кадыковский карьер                                 |
| 4 | Объект отбираемой<br>пробы               | вода                                               | вода                                               | вода                                               |
| 5 | Вид пробы                                | разовая                                            | разовая                                            | разовая                                            |
| 6 | Вид отбора пробы                         | последовательный                                   | последовательный                                   | последовательный                                   |
| 7 | Материал емкости                         | полиэтилен                                         | полиэтилен                                         | полиэтилен                                         |
| 8 | Проба отобрана для<br>проведения анализа | на токсичность методом<br>биотестирования          | на токсичность методом<br>биотестирования          | на токсичность методом<br>биотестирования          |
| 9 | Условия отбора                           | t, 18 °C      pH 7,92                              | t, 18 °C      pH 8,06                              | t, 18 °C      pH 7,2                               |

В результате разведения посевной культуры (в 25 раз) содержание питательных веществ в тестируемой воде соответствовало 2% среды Тамии, а исходная оптическая плотность тестируемой культуры составляла 0,005 [10].

Содержимое каждого стакана выливали во флаконы размером 6 см<sup>3</sup> (по 4 пробирки в каждом тестируемом варианте, включая контрольный образец). 24 заполненных флакона были закрыты чистыми полиэтиленовыми пробками, в которых было сделано отверстие диаметром 6 мм, чтобы обеспечить надлежащий газообмен со средой и предотвратить чрезмерное испарение культуральной жидкости. После 22 часов культивирования оптическую плотность суспензии водорослей измеряли во всех флаконах в измерителе плотности суспензии ИПС-03.

Степень токсического воздействия тестируемой воды на водоросли оценивалась по разнице в плотности тестовой культуры в контрольном и экспериментальном вариантах после 22 часов выращивания в культиваторе KBM-05.

По этой причине средняя оптическая плотность была рассчитана для каждого разбавления на основе результатов решения четырех параллелей.

Относительная разница (в %) в анализе средней плотности для каждого разбавления по сравнению с контролем (I) была рассчитана по формуле:

$$I = \frac{(\overline{D_K} - \overline{D_0})}{\overline{D_K}} \times 100,$$

где  $\overline{D_K}$  и  $\overline{D_0}$  – средние значения оптической плотности в контроле и в опыте соответственно.

В качестве второго испытательного объекта была использована *Daphnia magna* Straus [11].

Токсичность каждого образца без разбавления и каждого разбавления определяли в трех параллельных сериях. В качестве контроля используются три параллельных ряда с культивационной водой. Биотестирование проводилось в соответствии с требованиями к температуре, продолжительности фотопериода и качеству воды для выращивания.

Эксперимент проводился в специальных стеклянных контейнерах («пробирках») объемом 100 см<sup>3</sup>, которые были заполнены 50 см<sup>3</sup> исследуемой воды.

В пробирки помещали по десять дафний в возрасте 22 ч. и загружали на вращающиеся ленты устройства для экспонирования рачков УЭР-03. За счет вращения ленты проводилась непрерывная и равномерная аэрация всех проанализированных образцов.

Чтобы определить острую токсичность испытательной воды, рассчитывается процент погибших дафний в испытательной воде (А, %) по сравнению с контролем:

$$A = \frac{\overline{X_K} - \overline{X_T}}{\overline{X_K}} \cdot 100\%,$$

где  $\overline{X_K}$  – количество выживших дафний в контроле (среднее значение из трех параллельных определений);

$\overline{X_T}$  – количество выживших дафний в тестируемой воде (среднее значение из трех параллельных определений).

## Обсуждение результатов

**Оценка токсичности воды Инкерманского обводненного карьера.** Результаты регистрации результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла приве-

дены в табл. 2.

**Таблица 2** Регистрация результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла (Инкерманский обводненный карьер)

| № пробы  | Время биотестирования, час | Степень разбавления тестируемых вод, количество раз | № повторности    | Оптическая плотность             | Среднее значение оптической плотности | Процентное отклонение от контроля | Наличие токсического действия пробы: оказывает, не оказывает | Предел повторяемости для 4-х результатов параллельных измерений, n=4, в % |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|
| контроль | 22                         | 0                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,160<br>0,152<br>0,152<br>0,156 | 0,155                                 | 0                                 | -                                                            | 5,161                                                                     |
| 1        | 22                         | 1<br>(без разбавления)                              | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,068<br>0,062<br>0,064<br>0,065 | 0,064                                 | 58,709                            | оказывает                                                    | 9,266                                                                     |
| 2        | 22                         | 3                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,138<br>0,138<br>0,136<br>0,135 | 0,136                                 | 12,258                            | не оказывает                                                 | 2,193                                                                     |
| 3        | 22                         | 9                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,154<br>0,153<br>0,150<br>0,152 | 0,152                                 | 1,935                             | не оказывает                                                 | 2,627                                                                     |
| 4        | 22                         | 27                                                  | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,160<br>0,155<br>0,152<br>0,154 | 0,155                                 | 0                                 | не оказывает                                                 | 5,15                                                                      |
| 5        | 22                         | 81                                                  | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,158<br>0,159<br>0,158<br>0,157 | 0,158                                 | -1,935                            | не оказывает                                                 | 1,265                                                                     |

Как видно из табл. 2 в 2-5 пробах снижение средней оптической плотности по сравнению с контрольной версией не превышало 20 %, что указывает на то, что при разбавлении воды в 3-81 раз образец безвреден. В пробе без разбавления процентное отклонение от контроля составило 58,709%. Данные результаты подтверждают токсическое действие пробы.

Анализ данных показывает, что переход через критерий токсичности в виде 20% подавления роста имеет место между разбавлениями тестируемой воды в 1 и 3 раза. ТКР=10<sup>0,394</sup>

=2,477 раз. Количество погибших дафний в тестируемой воде (А) по сравнению с контролем для 1, 3, 9, 27, 81-кратного разбавления тестируемой воды в долях составило, соответственно: 0; 0; 0; 0; 0.

Анализ этих данных показывает, что переход через критерий безвредной кратности разбавлений в виде 10%-й смертности (в долях это 0,1) не наблюдается. Так как  $A \leq 10\%$ , то тестируемая вода не оказывает острого токсического воздействия. Результаты исследований приведены в табл. 3.

**Таблица 3** Протокол биотестирования (Инкерманский обводненный карьер)

| № п/п | Дата биотестирования | Место отбора проб               | Тест-объект | Продолжительность наблюдения (ч, сут) | Оценка тестируемой пробы                  |
|-------|----------------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1     | 20.04.2021 г.        | Инкерманский обводненный карьер | дафния      | 48 часов                              | не оказывает острое токсическое действие. |

**Оценка токсичности воды озера Гасфорта.** Данные регистрации результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла приведены в табл. 4.

В данном случае в 2-5 пробах снижение

**Таблица 4** Регистрация результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла (Шламохранилище у горы Гасфорта)

| № пробы  | Время биотестирования, час | Степень разбавления тестируемых вод, количество раз | № повторности    | Оптическая плотность             | Среднее значение оптической плотности | Процентное отклонение от контроля | Наличие токсического действия пробы: оказывает, не оказывает | Предел повторяемости для 4-х результатов параллельных измерений, $p=4$ , в % |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| контроль | 22                         | 0                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,155<br>0,188<br>0,158<br>0,162 | 0,165                                 | 0                                 | -                                                            | 19,9                                                                         |
| 1        | 22                         | 1 (без разбавления)                                 | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,050<br>0,061<br>0,057<br>0,062 | 0,057                                 | 65,45                             | оказывает                                                    | 19,04                                                                        |
| 2        | 22                         | 3                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,159<br>0,151<br>0,159<br>0,125 | 0,148                                 | 10,3                              | не оказывает                                                 | 22,89                                                                        |
| 3        | 22                         | 9                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,187<br>0,179<br>0,180<br>0,164 | 0,177                                 | -7,27                             | не оказывает                                                 | 12,95                                                                        |
| 4        | 22                         | 27                                                  | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,133<br>0,178<br>0,165<br>0,186 | 0,165                                 | 0                                 | не оказывает                                                 | 29                                                                           |
| 5        | 22                         | 81                                                  | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,199<br>0,153<br>0,164<br>0,176 | 0,173                                 | -4,84                             | не оказывает                                                 | 26,58                                                                        |

В пробе без разбавления процентное отклонение от контроля составило 65,45%. Данные результаты подтверждают токсическое действие пробы.

Значение индекса  $I$  для 1, 3, 9, 27 и 81-кратного разбавления тестируемой воды составили соответственно 65,45; 10,303; -7,272; 0; -4,84 %. В долях данные значения составили 0,654; 0,103; -0,072; 0; -0,048.

Анализ данных показывает, что переход через критерий токсичности в виде 20% подавления роста имеет место между разбавлениями тестируемой воды в 1 и 3 раза.  $TKP=10^{0,049}=1,12$  раз.

Количество погибших дафний в тестируемой воде ( $A$ ) по сравнению с контролем для 1, 3, 9, 27, 81-кратного разбавления тестируемой воды в долях составило, соответственно: 0,07;

средней величины оптической плотности по сравнению с контрольным вариантом не превышало 20 %, что свидетельствует о том, что при разбавлении воды от 3 до 81 раза проба является безвредной (табл. 4).

0,04; 0; 0,07; 0. Анализ этих данных показывает, что переход через критерий безвредной кратности разбавлений в виде 10%-й смертности (в долях это 0,1) не наблюдается. Так как,  $A \leq 10\%$ , тестируемая вода не оказывает острого воздействия. Результаты исследований приведены в табл. 5.

**Оценка токсичности воды Инкерманского обводненного карьера.** Результаты измерения оптической плотности тестовой культуры водорослей хлореллы в воде Кадыковского карьера представлены в табл. 6 [12].

Как и в предыдущих случаях в образцах 2–5 снижение средней оптической плотности по сравнению с контрольной версией не превышало 20 %, что указывает на то, что при разбавлении воды в 3–81 раз образец безвреден. В неразбавленных образцах процентное отклонение

от контроля составила 93,47%.

Значение индекса I для 1, 3, 9, 27 и 81-кратного разбавления тестируемой воды составили соответственно 93,47; 17,16; 12,686; 6,567; 1,343 %. В долях данные значения составили

**Таблица 5** Протокол биотестирования (Шламохранилище у горы Гасфорта)

| № п/п | Дата биотестирования | Место отбора проб              | Тест-объект | Продолжительность наблюдения (ч, сут) | Оценка тестируемой пробы                  |
|-------|----------------------|--------------------------------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------------|
| 1     | 28.04.2021 г.        | шламохранилище у горы Гасфорта | дафния      | 48 часов                              | не оказывает острое токсическое действие. |

0,9347; 0,1716; 0,1268; 0,065; 0,0134. Анализ данных показывает, что переход через критерий токсичности в виде 20% подавления роста имеет место между разбавлениями тестируемой воды в 1 и 3 раза.  $TKP=10^{0,458}=2,87$  раз.

**Таблица 6** Регистрация результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла (Кадыковский обводненный карьер) [12]

| № пробы  | Время биотестирования, час | Степень разбавления тестируемых вод, количество раз | № повторности    | Оптическая плотность             | Среднее значение оптической плотности | Процентное отклонение от контроля | Наличие токсического действия пробы: оказывает, не оказывает | Предел повторяемости для 4-х результатов параллельных измерений, $n=4$ , в % |
|----------|----------------------------|-----------------------------------------------------|------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Контроль | 22                         | 0                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,133<br>0,134<br>0,123<br>0,146 | 0,134                                 | 0                                 | -                                                            | 17                                                                           |
| 1        | 22                         | 1 (без разбавления)                                 | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,015<br>0,008<br>0,005<br>0,007 | 0,00875                               | 93,47                             | оказывает                                                    | 29                                                                           |
| 2        | 22                         | 3                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,124<br>0,116<br>0,096<br>0,108 | 0,111                                 | 17,16                             | не оказывает                                                 | 25                                                                           |
| 3        | 22                         | 9                                                   | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,117<br>0,121<br>0,114<br>0,117 | 0,117                                 | 12,686                            | не оказывает                                                 | 6                                                                            |
| 4        | 22                         | 27                                                  | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,123<br>0,123<br>0,124<br>0,131 | 0,1252                                | 6,567                             | не оказывает                                                 | 6                                                                            |
| 5        | 22                         | 81                                                  | 1<br>2<br>3<br>4 | 0,127<br>0,132<br>0,141<br>0,129 | 0,1322                                | 1,343                             | не оказывает                                                 | 10                                                                           |

Количество погибших дафний в тестируемой воде (А) по сравнению с контролем для 1, 3, 9, 27, 81-кратного разбавления тестируемой воды в долях были, соответственно: 0,166; 0,066; 0,051; 0,033; 0,015.

Анализ этих данных показывает, что переход к критериям безвредной кратности разбавлений в виде смертности 10% (в долях 0,1) имеет место между разведениями тестовой воды в 1 и 3

раза. Результаты исследований приведены в табл. 7.

Проведенная оценка токсичности воды Кадыковского карьера методом биотестирования подтвердила безопасность использования ресурсов данного водоема для использования в хозяйственно-питьевых целях при условии разбавления более чем в 3 раза.

**Таблица 7 - Протокол биотестирования (Кадыковский обводненный карьер) [12]**

| №<br>п/п | Дата<br>биотестирования | Место<br>отбора проб              | Тест-<br>объект | Продолжительность<br>наблюдения (ч, сут) | Оценка<br>тестируемой пробы                 |
|----------|-------------------------|-----------------------------------|-----------------|------------------------------------------|---------------------------------------------|
| 1        | 26.10.2020 г.           | Кадыковский<br>обводненный карьер | дафния          | 48 часов                                 | не оказывает острое<br>токсическое действие |

Анализируя данные, полученные при выполнении экспериментов по определению токсичности водных ресурсов методом биотестирования самыми безопасными для хозяйственно-питьевого использования являются воды озера Гасфорта (ТКР=1,12 раз). По увеличению разбавления объекты можно расположить в следующем порядке: Инкерманский карьер (ТКР=2,477 раз); Кадыковский карьер (ТКР=2,87 раз). При выполнении природоохранных мероприятий и при соблюдении всех санитарных правил и норм, при разбавлении водных ресурсов в 3-хкратном размере воды всех объектов можно использовать в хозяйственно-питьевых целях с дополнительной очисткой при подаче воды в жилые дома.

#### **Экологические последствия использования карьерных вод в качестве источников водоснабжения г. Севастополя**

С марта 2021 года в эксплуатацию был введен новый водозабор на реке Бельбек. Водозаборы на обводненных карьерах у горы Гасфорта и в Инкермане были демонтированы. Действующим остается водозабор из Кадыковского карьера [13].

Искусственный водный объект у горы Гасфорта является резервуаром долгосрочного регулирования, где вода накапливалась десятилетиями. В него не впадают ручьи, потому что река Сухая регулируется дамбой вверх по течению, а скважины пробурены в селах Резервное и Гончарное, а также и выше, поэтому водоем может пополняться только в очень заснеженные годы за счет поверхностного стока и дренажной воды.

При чрезмерном использовании водоема шламохранилище Гасфорта рискует превратиться в большую болотную яму, которая постепенно усохнет, пока окончательно не исчезнет.

Подача воды в Севастополь из озера у горы Гасфорта была прекращена в феврале 2021 г. [14]. Водозабор просуществовал 1,5 месяца. Современное состояние озера у горы Гасфорта на январь 2021 г. представлено на рис. 4.

Результат забора воды в обводненном карьере в Инкермане наглядно виден: уровень воды стремительно упал (рис. 5). Правительство планировало откачать миллион кубометров воды из водохранилища, предполагая, что резервуар восполняемый и этот выбор не нанесет большого ущерба [15].



а)



б)

**Рис. 4.** Современное состояние озера у горы Гасфорта (январь, 2021 г.)



а)



б)

**Рис. 5.** Обводненный карьер в Инкермане (апрель 2021 г.)

Однако 3 января рабочие приступили к демонтажу водопровода, установленного для передачи воды из Инкермана в резервуар Чернореченского водохранилища. По словам рабочих, отбирать воду из озера стало невозможно, так как был достигнут невосполнимый уровень. Если бы забор воды продолжился, то экосистема водохранилища перестала бы существовать. По словам сотрудников коммунальной водной службы, уровень воды в озере восстановится примерно через два года, когда засуха в Крыму закончится [16]. В Кадыковке есть пресноводные ресурсы. По мнению компетентных специалистов, гидрогеологов, заявления подтверждаются долгосрочными наблюдениями, в результате которых выяснилось, что воды в обводненном Кадыковском карьере по объему в разы больше, чем в Гасфорта.

В следствие этого, эти водные ресурсы оказались возобновляемыми из-за трещино-карстовой породы, обрамляющей по кругу этот карьер и из-за водоносного горизонта. Эти аргументы позволяют рассматривать данный карьер как долгосрочный и эффективный источник водоснабжения города Севастополя [14].

### Заключение

В данной работе было определено, что все источники, из которых были взяты пробы воды, не оказывают острое токсическое действие на живые организмы.

При проведении исследований более высокую чувствительность проявил тест-объект *Chlorella vulgaris Beijer*.

Проведенный анализ токсичности вод обводненных карьеров показал, что наиболее безопасными являются воды из озера у горы Гасфорта. Но так как забор воды неизбежно приведет к экологической катастрофе, отбирать воду из озера не представляется возможным: невосполнимый уровень для данного водоема был достигнут уже через пару недель после его использования. В данный момент озеро не рассматривается как источник водоснабжения.

Аналогичная ситуация сложилась с Инкерманским карьером, использование которого в качестве источника водоснабжения практически привело к заболачиванию обводненного карьера.

На сегодняшний день действующим остается водозабор из Кадыковского карьера. На данном объекте построена плавающая насосная станция, предназначенная для обеспечения забора из водоисточника расчетного расхода воды

и подачи его потребителю. Насосная станция является важным звеном в водопроводе от Кадыковского карьера до реки Черной, протяженностью 10 км. Затем вода поступает в узел для водоснабжения города. Уровень воды контролирует «умный буй». С помощью него доступна актуальная информация о температуре, прозрачности и уровне воды в водоеме с погрешностью плюс-минус 5 см.

Анализируя результаты проведенных опытов, можно сделать вывод, что вода из Кадыковского карьера пригодна для использования в целях хозяйственно-питьевого назначения. Водозабор производится на период, пока Чернореченское водохранилище – основной источник водопотребления г. Севастополя, наполняется водными ресурсами. Благодаря погодным условиям и приостановлению водозабора с данного объекта, водохранилище пополняется с каждым днем и, в скором времени, можно будет снова использовать его для подачи воды в дома жильцов города без использования дополнительных источников водоснабжения.

### Список литературы

1. 2021-й станет годом борьбы за водную автономию Крыма: Константинов [электронный ресурс] // Информационный портал «РИА Новости Крым», 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://crimea.ria.ru/society/20201208/1119029792/2021-y-stanet-godom-borby-za-vodnuyu-avtonomiyu-Kryma-Konstantinov.html> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
2. Анисимова Н. Севастополь ввел режим повышенной готовности из-за дефицита воды [электронный ресурс] // Информационный портал «Общество», 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://www.rbc.ru/society/13/10/2020/5f85e4959a7947a9de63f8b0> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
3. Севастополь: воды осталось на три месяца, власти строят трубопровод и водозабор [электронный ресурс] // Информационный портал «Крым. Реалии», 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://ru.krymr.com/a/news-sevastopol-voda/30897336.html> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
4. Из Инкерманского карьера готовятся перекачивать воду для Севастополя [электронный ресурс] // Информационный портал «Крым. Реалии», 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://ru.krymr.com/a/news-inkermanskii-karier-voda-sevastopol/30970006.html> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
5. Брать воду для Севастополя из Инкерманского озера стало невозможно [электронный ресурс] // Информационный портал «ИА Красная Весна»,

- 2020 г. – Электрон. Данные. URL: <https://tossaprimavera.ru/news/9b8f965e> (дата обращения: 20.02.2021 г.) – Заглавие с экрана.
6. Севастополь прекратил забор воды из Инкермана и озера у горы Гасфорта [электронный ресурс] // Информационный портал «РИА Новости Крым», 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://crimea.ria.ru/society/20210209/1119239019/Sevastopol-prekratil-zabor-vody-iz-Inkermana-i-ozera-u-gory-Gasforta.html> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
  7. Рюмина Е. «Голубая вода» в Кадыковском карьере под Севастополем чистая. К такому выводу пришли специалисты ГУПС «Водоканал» [электронный ресурс] // Информационный портал «Крым. Реалии», 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://www.sevastopol.kp.ru/daily/217197/4306903/> (дата обращения: 19.02.2021 г.). – Заглавие с экрана.
  8. Хуснуллин запустил водовод из Кадыковского карьера в Севастополе [электронный ресурс] // РИА Новости Крым, 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://crimea.ria.ru/society/20201219/1119068197/Khusnullin-zapustil-vodovod-iz-Kadykovskogo-karera-v-Sevastopole.html> Вода в Крыму РИА Новости Крым: (дата обращения: 20.02.2021 г.) – Заглавие с экрана.
  9. Рюмина Е. Важный запуск: Севастополь начал получать воду из Кадыковского карьера [электронный ресурс] // Комсомольская правда, 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://www.sevastopol.kp.ru/daily/1712102.5/4341158/> (дата обращения: 20.02.2021 г.) – Заглавие с экрана.
  10. Григорьев Ю.С. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. ПНД Ф Т 14.1:2.3:4.10-04 Т 16.1:2.3:3.7-04, ФР.1.39.2015.20001. Москва, 2004 (издание 2014 г.), 37 с.
  11. Григорьев Ю.С., Шашкова Т.Л. Методика измерений количества дафний (*Daphnia magna* Straus) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления методом прямого счета. ПНД Ф 14.1:2.4.12-06 Т 16.1:2.3.3.9-06, ФР.1.39.2015.19999. Москва, 2006 (издание 2014 г.), 39 с.
  12. Заблочкина Е.В., Кучерик Г.В., Дербасова Н.М., Тищенко Т.Н., Горбянская А.С. Оценка токсичности воды Кадыковского карьера / Энергетические установки и технологии, 2021. – Т. 7, №2, С. 169 – 176.
  13. Новый водозабор для снабжения Севастополя 1 марта запустят в опытную эксплуатацию [электронный ресурс] // Интерфакс, 2021 г. – Электрон. данные. URL: <https://www.interfax.ru/russia/751591> (дата обращения: 20.02.2021 г.) – Заглавие с экрана.
  14. К чему приведут непродуманные действия по забору воду из шламохранилища у горы Гасфорта? [электронный ресурс] // «ИНФОРМЕР» 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://sevastopol.bezformata.com/listnews/vodu-iz-shlamohranilisha-u-gori-gasforta/88315354> (дата обращения: 22.05.2021 г.) – Заглавие с экрана.
  15. Озеро в Инкермане тает на глазах [электронный ресурс] // РИА Новости Крым 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://zen.yandex.ru/media/nefotograf/ozero-v-inkermane-taet-na-glazah-posledstviia-vodnogo-krizisa-v-sevastopole-i-krymu-5fd3921d33ed420c3fbcf037> (дата обращения: 22.05.2021 г.) – Заглавие с экрана.
  16. Из Инкерманского озера больше не качают воду для Севастополя. [электронный ресурс] // Служба новостей ForPost. 2020 г. – Электрон. данные. URL: <https://sevastopol.su/news/iz-inkermanskogo-ozera-bolshe-ne-kachayut-vodu-dlya-sevastopolya> (дата обращения: 22.05.2021 г.)

## References

1. 2021-y stanet godom borby za vodnuyu avtonomiyu Kryma: Konstantinov [2021 will be the year of struggle for Crimean water autonomy: Konstantinov] Available at: <https://crimea.ria.ru/society/20201208/1119029792/2021-y-stanet-godom-borby-za-vodnuyu-avtonomiyu-Kryma-Konstantinov.html> (accessed 19.02.2021).
2. Anisimova N. *Sevastopol vvel rezhim povyshennoy gotovnosti iz-za defitsita vody* [Sevastopol introduced high alert due to water shortage]. Available at: <https://www.rbc.ru/society/13/10/2020/5f85e4959a7947a9de63f8b0> (accessed 19.02.2021).
3. *Sevastopol': vody ostalos' na tri mesyaca, vlasti sroyat truboprovod i vodozabor* [Sevastopol: water is left for three months, the authorities are building a pipeline and water intake]. Available at: <https://ru.krymr.com/a/news-sevastopol-voda/30897336.html> (accessed 19.02.2021).
4. *Iz Inkermanskogo kar'era gotovyatsya perekachivat' vodu dlya Sevastopolya* [They are preparing to pump water for Sevastopol from the Inkerman quarry] available at: <https://ru.krymr.com/a/news-inkermanskii-karier-voda-sevastopol/30970006.html> (accessed 19.02.2021).
5. *Brat' vodu dlya Sevastopolya iz Inkermanskogo ozera stalo nevozmozhno* [It became impossible to take water for Sevastopol from Lake Inkerman]. Available at:

- <https://rossaprimavera.ru/news/9b8f965e> (accessed 20.02.2021).
6. Sevastopol' prekratil zabor vody iz Inkermana i ozera u gory Gasforta [Sevastopol stopped taking water from Inkerman and the lake near Mount Gasfort]. Available at: <https://crimea.ria.ru/society/20210209/1119239019/Sevastopol-prekratil-zabor-vody-iz-Inkermana-i-ozera-u-gory-Gasforta.html> (accessed 19.02.2021).
  7. Ryumina E. «Golubaya voda» v Kadykovskom kar'ere pod Sevastopolem chistaya. K takomu vyvodu prishli specialisty GUPS «Vodokanal» [«Blue water» in the Kadykovsky quarry near Sevastopol is clean. This is the conclusion reached by the specialists of the state unitary enterprise "Vodokanal"]. Available at: <https://www.sevastopol.kp.ru/daily/217197/4306903/> (accessed 19.02.2021).
  8. Husnullin zapustil vodovod iz Kadykovskogo kar'era v Sevastopole [Khusnullin launched a water pipeline from the Kadykovsky quarry in Sevastopol]. Available at: <https://crimea.ria.ru/society/20201219/1119068197/Khusnullin-zapustil-vodovod-iz-Kadykovskogo-karera-v-Sevastopole.html> Voda v Krymu RIA Novosti Krym: (accessed 20.02.2021).
  9. Ryumina E. Vazhnyj zapusk: Sevastopol' nachal poluchat' vodu iz Kadykovskogo kar'era [An important launch: Sevastopol began to receive water from the Kadykovsky quarry]. Available at: <https://www.sevastopol.kp.ru/daily/1712102.5/4341158/> (accessed 20.02.2021).
  10. Grigoryev Yu.S. Metodika izmereniy opticheskoy plotnosti kultury vodorosli khlorella (*Chlorella vulgaris* Beijer) dlya opredeleniya toksichno-sti pityevykh, presnykh prirodnykh i stochnykh vod. vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya [Methodology for measuring the optical density of the culture of the chlorella (*Chlorella vulgaris* Beijer) algae to determine the toxicity of drinking, fresh natural and waste water, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste], Moscow, 2004, 37 p.
  11. Grigoryev Yu.S., Shashkova T.L. Metodika izmereniy kolichestva dafniy (*Daphnia magna* Straus) dlya opredeleniya toksichnosti pityevykh, presnykh prirodnykh i stochnykh vod, vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya metodom pryamogo scheta [Methodology for measuring the amount of daphnia (*Daphnia magna* Straus) to determine the toxicity of drinking, fresh natural and waste waters, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste by the direct counting method], Moscow, 2006, 39 p.
  12. Zablokaya E.V., Kucherik G.V., Derbasova N.M., Tishchenko T.N., Gorblyanskaya A.S. Ocenka toksichnosti vody Kadykovskogo kar'era / Energeticheskie ustanovki i tekhnologii, 2021, Vol. 7, No. 2, pp. 169 – 176.
  13. Novyy vodozabor dlya snabzheniya Sevastopolya 1 marta zapustyat v opytnuyu ekspluatatsiyu [A new water intake for supplying Sevastopol will be put into trial operation on March 1]. Available at: <https://www.interfax.ru/russia/751591> (accessed 20.02.2021).
  14. K chemu privedut neprodumannye dejstviya po zaboru vodu iz shlamohranilishcha u gory Gasforta? [What will the ill-conceived actions of taking water from the sludge storage near Gasfort Mountain lead to?]. Available at: <https://sevastopol.bezformata.com/listnews/vodu-iz-shlamohranilisha-u-gorigasforta> (accessed 22.05.2021).
  15. Ozero v Inkermane taet na glazah [The lake in Inkerman is melting before our eyes]. Available at: <https://zen.yandex.ru/media/nefotograf/ozero-v-inkermane-taet-na-glazah-posledstviia-vodnogo-krizisa-v-sevastopole-i-krymu-5fd3921d33ed420c3fbcf037> (accessed 22.05.2021).
  16. Iz Inkermanskogo ozera bol'she ne kachayut vodu dlya Sevastopolya [Water for Sevastopol is no longer pumped from Inkerman Lake]. Available at: <https://sevastopol.su/news/iz-inkermanskogo-ozera-bolshe-ne-kachayut-vodu-dlya-sevastopolya>

УДК 661.333+67.08

## Оценка токсичности жидких отходов производства соды и перспективы их утилизации

Г.В. Кучерик, Д.В. Гонтаренко, Ю.А. Омельчук, Д.М. Сытников, О.В. Флерко  
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,  
г. Севастополь, 299053, Россия, Galina\_kucherik@mail.ru

Статья поступила 06.09.2021 г.; после доработки 08.09.2021 г.

### Аннотация

В работе рассмотрены токсичные свойства жидких отходов, образующихся в процессе производства соды. Определен класс опасности дистиллерной жидкости экспериментальным методом. Выполнен обзор современных методов утилизации крупнотоннажных отходов содового производства, а так же предложены наиболее актуальные направления использования данного отхода в настоящее время.

**Ключевые слова:** производство соды, дистиллерная жидкость, биотестирование, класс опасности, утилизация отходов.

## Evaluation of the toxicity of liquid waste from soda production and the prospects for their disposal

G.V. Kucherik, D.V. Gontarenko, Yu.A. Omel'chuk, D.M. Sytnikov, O.V. Flerko  
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,  
Galina\_kucherik@mail.ru

Received 06.09.2021 y.; received in final form 08.09.2021 y.

### Abstract

The paper considers the toxic properties of liquid waste generated during the production of soda. The hazard class of distilled liquid was determined by experimental methods. A review of modern methods of disposal of large-tonnage soda production wastes has been carried out, as well as the most relevant directions for the use of this waste at the present time are proposed.

**Keywords:** soda production, distiller liquid, biotesting, hazard class, waste disposal.

### Введение

Практически в любом производственном цикле химической промышленности некоторые вещества не имеют возможности дальнейшего использования в данной технологии (в силу многих факторов наиболее распространенным является их различие между требуемыми показателями качества) - отходы. Количество этих веществ не только во многом определяет культуру производства и экологическую безопасность, но и существенно влияет на экономическое благополучие самого предприятия и его

отрасли. Это влияние включает в себя необходимость отказа от добычи сырья и затраты на первичную переработку из-за производственных затрат. Поэтому возникает ситуация, когда стоимость готового продукта формируется также за счет тех компонентов (сырья и энергии), которые фактически не участвуют в его получении. В результате продукция данного производственного объекта вряд ли может отвечать современным требованиям экологической промышленной безопасности, а также испытывает сложности в конкуренции с соответствующими аналогами, не имеющими данных проблем.

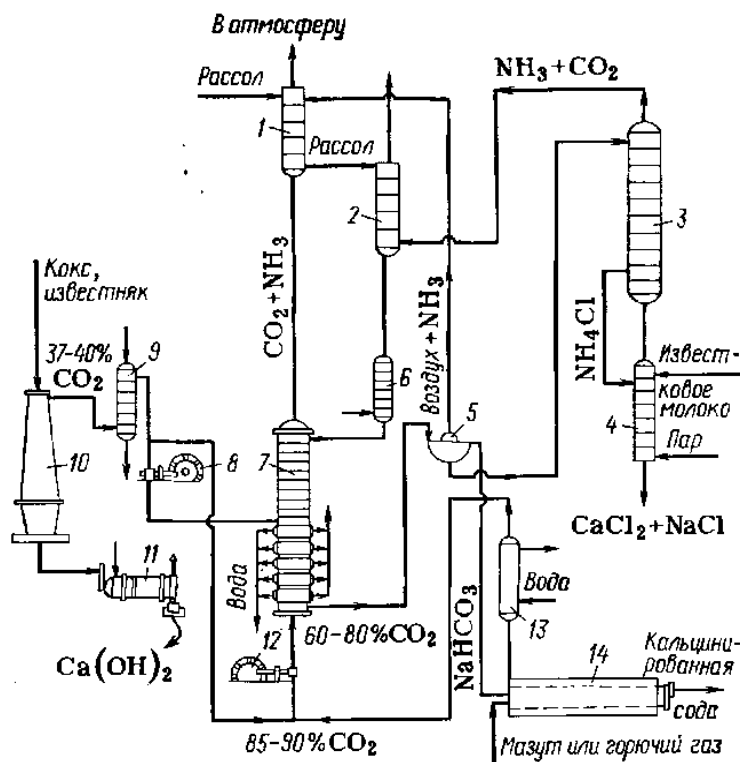
Вышеперечисленные проблемы связаны с крупнотоннажными отраслями промышленности, в том числе с содовыми заводами.

Проблема утилизации отходов производства кальцинированной соды аммиачным способом имеет особую актуальность, поскольку шламы рассолоочистки и дистилляции являются наиболее многотоннажными отходами, а дистиллерная жидкость загрязняет водные бассейны.

Содовое производство – это сложный ком-

плекс цехов и служб, объединенных в единую технологическую линию. Классическим методом получения кальцинированной соды является аммиачный способ, который заключается во взаимодействии насыщенного водного раствора хлористого натрия и углекислого газа в присутствии аммиака с образованием бикарбоната натрия и последующей его кальцинацией.

Общая технологическая схема производства кальцинированной соды аммиачным способом показана на рис. 1.



**Рис. 1.** Технологическая схема получения кальцинированной соды аммиачным способом: 1 - промыватель газов; 2 - абсорбер; 3 - дистилляционная; 4 - смеситель; 5 - вакуум-фильтр; 6 - холодильник аммонизированного рассола; 7 - карбонизационная колонна; 8, 12 - компрессоры; 9 - холодильник-газоочиститель; 10 - известково-обжигательная печь; 11 - аппарат для гашения извести; 13 - холодильник-промыватель, 14 - содовая печь.

Существенным недостатком аммиачного способа производства соды является наличие большого количества высокоминерализованной суспензии в виде отходов производства, так называемой дистиллерной жидкости, шлама рассолоочистки, отсевов карбонатного сырья, отходов гашения извести.

Дистиллерная жидкость – это суспензия  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$  и ряда нерастворимых примесей ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{FeO}$  и др.) в растворе  $\text{CaCl}_2$  и  $\text{NaCl}$ . Это главный отход содопроизводства: на 1 тонну соды 35 образуется около 2 тонн дистиллерной жидкости, которая непосредственно поступает в горизонтальные шламонакопители («белые моря»), под которые отводятся сотни гектаров земель и строительство

которых обходится в десятки миллионов рублей.

Усредненный состав дистиллерной жидкости следующий, г/м<sup>3</sup>:

|                                                       |        |
|-------------------------------------------------------|--------|
| $\text{CaCl}_2$ .....                                 | 85-95; |
| $\text{NaCl}$ .....                                   | 45-50; |
| $\text{CaCO}_3$ .....                                 | 6-15;  |
| $\text{CaSO}_4$ .....                                 | 3-5;   |
| $\text{Mg(OH)}_2$ .....                               | 3-10;  |
| $\text{CaO}$ .....                                    | 2-4;   |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al}_2\text{O}_3$ ..... | 1-3;   |
| $\text{SiO}_2$ .....                                  | 1-4.   |

Экологическая и токсикологическая опасность содовых шламов обусловлена содержанием в поровом пространстве слоя осадка раство-

ра, состав которых аналогичен поступающим в структуру промышленным сточным водам, которые смываются при контакте с водой.

Сброс этих отходов в водные объекты приводит к их чрезмерной минерализации и повышенной жесткости, что наносит ущерб окружающей среде. В связи с постоянным ужесточением требований экологической безопасности и нерациональным использованием материальных ресурсов этот вопрос становится все более актуальным во всем мире. Методы обработки этих отходов находятся в стадии разработки, но из-за их большого количества они продолжают сбрасываться в близлежащие резервуары или храниться в иловых накопителях (отстойниках или «белых морях»).

### Постановка задачи

В связи с вышесказанным цель данной работы состояла в оценке токсичных свойства жидких отходов, образующихся в процессе производства соды, определении класса опасности дистиллерной жидкости экспериментальным методом, анализе современных методов утилизации крупнотоннажных отходов содового производства.

### Методика проведения исследований

В работе класс опасности жидких отходов – дистиллерной жидкости – был определен экспериментальным способом.

Биотестирование при экспериментальном установлении класса опасности отхода проводят с использованием не менее двух тест-объектов из разных систематических групп. За окончательный результат принимается класс опасности, выявленный на тест-объекте, проявившем более высокую чувствительность к анализируемому отходу.

Класс опасности устанавливается по кратности разбавления водной вытяжки (табл. 1).

**Таблица 1** – Установление класса опасности по кратности разбавления водной вытяжки, при которой не выявлено воздействие на гидробионтов

| Класс опасности отхода | Кратность разведения водной вытяжки из опасного отхода, при которой вредное воздействие на гидробионтов отсутствует |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I                      | > 10000                                                                                                             |
| II                     | От 10000 до 1001                                                                                                    |
| III                    | От 1000 до 101                                                                                                      |
| IV                     | < 100                                                                                                               |
| V                      | 1                                                                                                                   |

В качестве тест-объектов в работе были использованы рачки дафний (*Daphnia magna Straus*) и микроводоросли (*Chlorella vulgaris Beijer*).

При определении класса опасности с помощью рачков *Daphnia magna Straus* [1] готовили ряд разбавлений дистиллерной жидкости кратных 10-ти.

Определение токсичности каждой пробы без разбавления и каждого разбавления проводили в трех параллельных сериях. В качестве контроля использовали три параллельные серии с культивационной водой. Биотестирование проводили в специальных «пробирках», входящих в комплект устройства УЭР-03, которые заполняли 50 мл исследуемой воды. В пробирки помещали по десять дафний в возрасте 6 – 24 ч. Посадку начинали с контрольной серии. Затем пробирки помещали в устройство для экспонирования рачков (УЭР). Спустя 48 ч определяли смертность дафний во всех пробирках. Особи считались погибшими, если не начали двигаться спустя 15 секунд после легкого покачивания пробирки. Затем рассчитывали %-ое отклонение от контроля, а так же летальную (ЛКР) и безвредную кратность разбавления (БКР).

Результаты биотестирования пробы (дистиллерной жидкости) приведены в табл. 2, 3.

Согласно кратности разведения водной вытяжки, БКР10-48 составила 100 раз. Таким образом, исходя из табл. 1, отход относится к IV классу опасности для ОС ( $1 < K_p \leq 100$ ).

Тест культуру *Chlorella vulgaris Beijer* вносили по 1,9 мл в 6 стаканов с 45 мл контрольной и тестируемых проб [2]. Затем содержимое каждого стакана разливали по 6 мл во флаконы-реакторы (по 4 флакона на каждый вариант тестируемой воды, включая контрольную пробу). Все пробирки закрывали пробками и определяли ростовые характеристики культуры водоросли хлорелла во многоцветном культиваторе КВМ-05 в течении 22 часов. Рассчитывали относительную (в %) разницу средней величины оптической плотности для каждого разведения по сравнению с контролем, а затем ТКР. Регистрация результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла приведена в табл. 4.

Оценка токсичности пробы с помощью водоросли хлорелла, подтвердила 4 класс опасности.

**Таблица 2 – Результаты биотестирования пробы (дистиллерной жидкости)**

| № пробы | Кратность разбавления водной вытяжки, раз | Среднее число выживших особей | A,% | Воздействие                                | ЛКР 50-48                                                                                                | БКР 10-48                                                                  |
|---------|-------------------------------------------|-------------------------------|-----|--------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------|
| 6       | контроль                                  | 10                            | -   | -                                          | 2,81% концентрации исследуемой воды вызывает 50 % гибель тест-объектов за 48 часов, ЛКР 50-48 = 35,5 раз | 1 % концентрации исследуемой воды является безвредной, БКР 10-48 = 100 раз |
| 5       | в 10 000                                  | 9,33                          | 6,7 | не оказывает острого токсического действия |                                                                                                          |                                                                            |
| 4       | в 1 000                                   | 9,66                          | 3,4 |                                            |                                                                                                          |                                                                            |
| 3       | в 100                                     | 9                             | 10  |                                            |                                                                                                          |                                                                            |
| 2       | в 10                                      | 0                             | 100 | оказывает острое токсическое действие      |                                                                                                          |                                                                            |
| 1       | без разбавления                           | 0                             | 100 |                                            |                                                                                                          |                                                                            |

**Таблица 3 – Результаты биотестирования**

| № п/п | Дата биотестирования | Тест объект | Продолжительность наблюдений (ч, сут) | Оценка тестируемой пробы                                                           |
|-------|----------------------|-------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| 1     | 21.04.2021 г.        | дафнии      | 48 часов                              | Не оказывает острое токсическое действие. Безвредная кратность разбавления 100раз. |

**Таблица 4 – Регистрация результатов измерения оптической плотности тест-культуры водоросли хлорелла**

| Пробы    | Время биотестирования, в часах | Степень разбавления тестируемых вод, количество раз | № повторности | Оптическая плотность | Среднее значение оптической плотности | Процентное отклонение от контроля | Оценка качества водной среды; оказывает (не оказывает) острое токсическое действие | Предел повторяемости для 4-х результатов параллельных измерений, n = 4, в % |
|----------|--------------------------------|-----------------------------------------------------|---------------|----------------------|---------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Контроль | 22                             | 0                                                   | 1             | 0,141                | 0,14                                  | -                                 | -                                                                                  | 6,42                                                                        |
|          |                                |                                                     | 2             | 0,136                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 3             | 0,145                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 4             | 0,138                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
| 1        | 22                             | 1 (без разбавления)                                 | 1             | 0,048                | 0,05                                  | 64                                | оказывает                                                                          | 24,6                                                                        |
|          |                                |                                                     | 2             | 0,061                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 3             | 0,051                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 4             | 0,051                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
| 2        | 22                             | 10                                                  | 1             | 0,114                | 0,11                                  | 18                                | не оказывает                                                                       | 7                                                                           |
|          |                                |                                                     | 2             | 0,117                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 3             | 0,109                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 4             | 0,116                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
| 3        | 22                             | 100                                                 | 1             | 0,113                | 0,12                                  | 14                                | не оказывает                                                                       | 13,3                                                                        |
|          |                                |                                                     | 2             | 0,129                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 3             | 0,114                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 4             | 0,125                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
| 4        | 22                             | 1000                                                | 1             | 0,148                | 0,14                                  | 0                                 | не оказывает                                                                       | 12,8                                                                        |
|          |                                |                                                     | 2             | 0,134                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 3             | 0,130                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 4             | 0,148                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
| 5        | 22                             | 10000                                               | 1             | 0,152                | 0,15                                  | -7                                | не оказывает                                                                       | 3,8                                                                         |
|          |                                |                                                     | 2             | 0,157                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 3             | 0,157                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |
|          |                                |                                                     | 4             | 0,151                |                                       |                                   |                                                                                    |                                                                             |

### Анализ методов утилизации жидких отходов производства соды

Производство кальцинированной соды по аммиачному методу связано с использованием природных материальных ресурсов: известняка ( $\text{CaCO}_3$ ) и каменной соли ( $\text{NaCl}$ ). На 1 тонну кальцинированной соды образуется 10-12 м<sup>3</sup> дистиллерной жидкости – отхода производства, содержащего твердую и жидкую фазу. Процент использования в технологии соды карбонатного сырья составляет около 80 %, а каменной соли около 70 %. Таким образом, очевидно, что значительная часть природного сырья используется не рационально и складывается в виде отходов в шламонакопителях, так называемых «белых морях». Жидкие отходы производства кальцинированной соды усугубляют экологическое состояние районов производства кальцинированной соды. Задача ученых и промышленников – свести к минимуму нарушение экологического равновесия, а это может быть решено внедрением новых технологий, позволяющих реализовать почти все отходы горных и подземных пород, использующихся в производстве соды.

На сегодняшний день предложены разнообразные варианты использования отходов производства соды, обусловленные их физическими и химическими параметрами.

Анализ информации позволил определить, что отходы производства соды можно применять в различных отраслях строительства. Утилизация отходов с производством строительных материалов может одновременно решить несколько задач: экономия природных ресурсов, снижение стоимости строительных изделий за счет снижения стоимости компонентов, использование техногенных отходов и улучшение качества окружающей среды.

Направления и варианты использования отходов содового производства в строительной отрасли приведены на рис. 2.

Одним из основных направлений является *дорожное строительство* [3].

Именно оно предусматривает масштабное извлечение отходов из шламохранилищ, и дальнейшее использование без всякой очистки. Как видно из табл. 5, гранулометрический состав глины, традиционно используемой в дорожном строительстве, весьма схож с составом содового шлама, что существенно влияет на плотность покрытия.

Добавление шлама в состав дорожных смесей повышает их прочностные характеристики, позволяя увеличить предел прочности смеси

более чем в ~2,5 раза в сравнении со стандартным вариантом ее композиции. Кроме экономии на материалах при строительстве дорог, не менее значительным эффектом будет снижение темпов заполнения шламонакопителя и перенос возведения нового на отдаленное время. Еще одним перспективным вариантом является *производство строительной шпатлевки*.

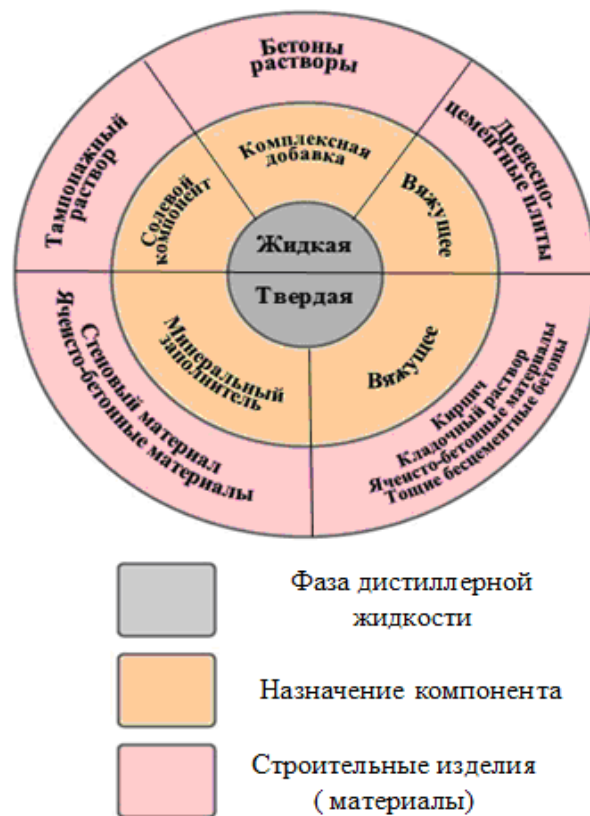


Рис. 2. Направления и варианты использования отходов производства соды в строительной отрасли

Таблица 5 Сравнительный анализ гранулометрических составов глины и шлама методом мокрого распада [3]

| Размер части, мм | Доля фракции в общем объеме, в % |       |
|------------------|----------------------------------|-------|
|                  | Шлам                             | Глина |
| 1,5              | 60                               | 52    |
| 0,08             | 15                               | 23    |
| 0,063            | 4                                | 4     |
| Менее 0,063      | 21                               | 21    |

Изучение результатов количественных и качественных анализов шпатлевки подтверждают возможность использования в качестве сырьевой базы для ее производства - отходов производства соды [4].

Они придают готовому продукту антибактериальные свойства, тем самым значительно улучшая качество и гигиенические показатели.

Вязущее на основе отходов производства соды позволяет использовать его для производства силикатного кирпича [5]. Технология производства не отличается от общепринятой схемы получения кирпича на основе извести. Согласно результатам исследований, приведенным в табл. 6, видно, что кладочный раствор, изготовленный с использованием вязущего на основе отходов набирает прочность к 14-дневному возрасту, а с добавлением цемента, раствор к 14-дневному возрасту достигает почти 100 % прочности.

**Таблица 6** Относительная прочность раствора [5]

| Раствор                       | Относительная прочность раствора, % в возрасте, сут. |    |     |
|-------------------------------|------------------------------------------------------|----|-----|
|                               | 7                                                    | 14 | 28  |
| Обычный цементно-известковый  | 65                                                   | 80 | 100 |
| Известково-белитовый          | 62                                                   | 85 | 100 |
| Цементно-известково-белитовый | 78                                                   | 95 | 100 |

Авторами [6] предложен вариант производства из жидких отходов производства соды *мелиоранта и комплексной минеральной добавки*.

Мелиорант, полученный из отходов, не уступает известковой пыли, гипсу, мелу, но и часто превышает их по качеству. Наличие карбонатов кальция и магния в составе этого минерального комплекса способствует насыщению кислотных почв ионами Са и Mg, что формирует благоприятный pH.

Еще одним способом снижения количества отходов является их *переработка с получением товарных продуктов*. В настоящее время существует несколько направлений решения проблемы утилизации отходов: получение из дистиллерной жидкости хлоридов кальция и натрия; применение дистиллерной жидкости в нефтегазодобывающей промышленности; использование шлама для получения гидроксида кальция и других продуктов. Однако расширение объемов такого способа переработки дистиллерной суспензии сдерживается ограниченным потреблением данных продуктов в народном хозяйстве.

Одним из перспективных способов утилизации дистиллерной жидкости может быть ее использование в качестве сырья для получения высококачественного химически осажденного карбоната кальция, нашедшего широкое приме-

нение во многих отраслях промышленности: пищевой, медицинской, косметической, резинотехнической, кабельной, бумажной, лакокрасочной, химической, в производстве пластмасс и полимеров, в сельском хозяйстве и т. д. [7]. В связи с возрастающей потребностью народного хозяйства в данном продукте повышаются требования к качеству карбоната кальция, который получают в основном карбонизацией известкового молока. В силу природных свойств используемого сырья этот способ не дает возможность улучшить основные показатели качества продукта – остаточную свободную щелочность, дисперсность и насыпную плотность. Проблема может быть решена, если в качестве источника кальциевых ионов использовать растворы хорошо растворимых солей кальция, которым может стать дистиллерная жидкость.

Оптимальным с технологической точки зрения способом получения высококачественного синтетического карбоната кальция является осаждение его из дистиллерной жидкости с помощью раствора карбоната натрия. Однако в случае использования в качестве второго реагента раствора соды стоимость продукта будет определяться стоимостью производственной кальцинированной соды. Поэтому с экономической точки зрения наиболее целесообразно использовать в качестве содового раствора жидкие отходы, образующиеся в различных отделениях содового производства. Такими отходами, например, могут стать избыточные маточные растворы производства очищенного бикарбоната натрия, содержащие карбонатные и гидрокарбонатные ионы [8].

Представляет большой интерес использование дистиллерной жидкости для производства других видов продукции, в частности получение пероксида кальция [9].

Пероксид кальция находит широкое применение во многих отраслях народного хозяйства. В области охраны окружающей среды его можно использовать при очистке воды от катионов железа, мышьяка, марганца, цинка, хрома и меди. Также пероксид кальция можно использовать в катализаторе для очистки промышленных и бытовых сточных вод от нефтепродуктов и для очистки сточных вод содержащих органические красители. Очистка вредных газовых выбросов химической промышленности от диоксида серы и оксидов азота может быть обеспечена суспензией содержащей смесь пероксида и гидроксида кальция в соотношении 1:1. Также можно осуществить и очистку газовой смеси от формальдегида. Пероксид кальция

применяют в обезвреживании радиоактивных отходов переменного состава. Его используют и для обеззараживания ила бытовых городских стоков. В органическом синтезе пероксид кальция используется как катализатор для окисления изопропилбензола до  $\alpha$ -кумулгидроперекиси и для получения полисульфидов этилена, пропилена, бутилена. Пероксид кальция используется и для насыщения кислородом нижних частей искусственных и естественных водоемов.

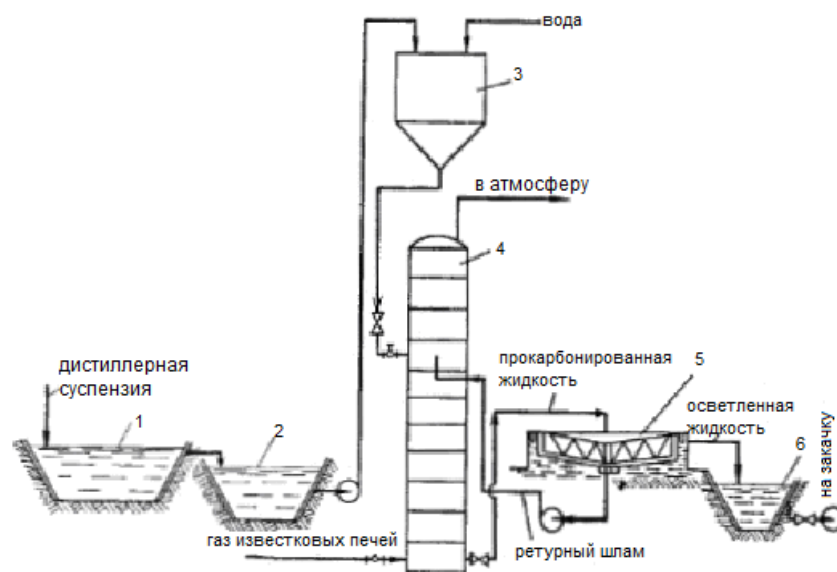
Основными потребителями хлористого кальция являются сельское хозяйство (мелиорация солончаковых почв), строительство ( $\text{CaCl}_2$  увеличивает скорость схватывания бетона), холодильная техника (приготовление охлаждающих растворов), а также фармацевтическая и текстильная промышленность и другие отрасли народного хозяйства [10].

При переработке отбросной дистиллерной жидкости наряду с хлористым кальцием получают поваренную соль, используемую как товарный продукт и в качестве сырья для производства соды. Соответственно видам выпускаемой продукции процесс концентрирования осветленной дистиллерной жидкости ведется при определенном технологическом режиме с соблюдением таких температурных и барометрических условий, при которых в твердую фазу вначале выделяется хлористый натрий с доведением концентрации  $\text{CaCl}_2$  в жидкой фазе до 38%, что отвечает требуемому составу товарно-

го жидкого хлористого кальция. При выпуске плавленого или чешуйчатого твердого продукта полученный 38%-ный раствор  $\text{CaCl}_2$  подвергается дальнейшему концентрированию с промежуточным отделением дополнительно выпадающей в осадок поваренной соли.

Получение хлористого аммония из фильтровой жидкости содового производства в промышленности осуществляется методами выпаривания и высаливания [11]. Производство хлористого аммония в крупном масштабе целесообразно главным образом в связи с потреблением его в сельском хозяйстве в качестве удобрения. Хлористый аммоний применяется также для пайки и лужения металлов, приготовления гальванических элементов и др. При переработке фильтровой жидкости в качестве побочного продукта получается поваренная соль.

Существует также вариант закачки дистиллерной жидкости в нефтяные скважины [12] (рис. 3), который обладает следующими преимуществами: увеличивается нефтеотдача за счет использования жидкости с большей плотностью; отпадает необходимость затраты большого количества тепла для испарения воды в производстве хлорида кальция при выделении солей, содержащихся в дистиллерной жидкости, возможность использования для подготовки жидкости накопители — «белые моря», — традиционно располагающиеся возле каждого завода, производящего соду аммиачным способом.



**Рис. 3.** Схема подготовки дистиллерной жидкости для закачивания в нефтяные скважины: 1 - первый отсек отстойника («белое море»); 2 - второй отсек отстойника; 3 - резервуар смешения; 4 - карбонизационная колонна; 5 - сгуститель; 6 - ёмкость осветленной жидкости

## Заключение

В данной работе произведена оценка токсичных свойства жидких отходов, образующихся в процессе производства соды. Определен класс опасности дистиллерной жидкости экспериментальным методом.

Отнесение отходов к тому или иному классу опасности важно и с экономической точки зрения, так как класс опасности является основным показателем, определяющим сумму платы за негативное воздействие на окружающую природную среду. Разница в платежах между отходами разных классов опасности существенна. Вот почему определение класса опасности отходов является актуальной задачей при организации работ по обращению с отходами производства и потребления на предприятии. В ходе биотестирования использовались два тест-объекта: *Daphnia magna Straus* и *Chlorella vulgaris*. Проведенное исследование позволяет сделать вывод, что отходы производства кальцинированной соды относятся к IV классу опасности, который является «малоопасным» и имеет низкую степень негативного воздействия на окружающую среду.

В работе рассмотрены возможные пути утилизации отходов образующихся в процессе производства.

Одним из традиционных направлений переработки отходов производства соды является производство из них строительных материалов. На данный момент в Крыму отмечается стремительный рост развития строительной отрасли. В ближайшие пять лет планируют увеличить темпы строительства жилья в два раза. Состояние крымских дорожных артерий вызывает глубокую озабоченность. В настоящее время основная часть дорог нуждается в капитальном ремонте либо реконструкции. Следовательно, большая потребность в строительных материалах, делают это направление переработки отходов перспективным, так как позволяют массово использовать отходы производства и потребления в дальнейшей хозяйственной деятельности, при этом удешевляя стоимость строительства, сокращая потребление природных ресурсов и изъятие земель для добычи природного сырья, необходимого для производства строительных материалов.

## Список литературы

1. Григорьев Ю.С. Методика измерений оптической плотности культуры водоросли хлорелла (*Chlorella vulgaris* Beijer) для определения токсичности

- сичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления. ПНД Ф Т 14.1:2:3:4.10-04 Т 16.1:2:2.3:3.7-04, ФР.1.39.2015.20001. Москва, 2004 (издание 2014 г.), 37 с.
2. Григорьев Ю.С., Шашкова Т.Л. Методика измерений количества дафний (*Daphnia magna Straus*) для определения токсичности питьевых, пресных природных и сточных вод, водных вытяжек из грунтов, почв, осадков сточных вод, отходов производства и потребления методом прямого счета. ПНД Ф 14.1:2:4.12-06 Т 16.1:2.3.3.9-06, ФР.1.39.2015.19999. Москва, 2006 (издание 2014 г.), 39 с.
3. Козлов С.Г., Вязовикова И.В., Черный С.А., Крепышева И.В. Использование отходов содового производства в дорожном строительстве // Фундаментальные исследования. Технические науки. – 2013, № 10. – С. 2604-2611.
4. Манойло Е.В., Манойло Ю.А., Камбург В.Г., Моисеев В.Ф. Применение отходов содового производства в строительстве // Региональная архитектура и строительство. – 2012. – № 1. – С. 43-50.
5. Калинина Е.В. Утилизация шламов карбоната кальция в производстве товарных продуктов строительной отрасли // Градостроительная и отраслевая экология – Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2012. – № 1. – С. 97–113.
6. Сивкова Д.М., Калинина Е.В. Нетрадиционные известковые мелиоранты // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. – 2018. – Т. 1. – С. 96-99.
7. Михайлова Е. А., Лобойко А. Я., Молчанов В. И., Панасенко В. А. Перспективы направления утилизации отходов содового производства // Тезисы докладов конф. с междунар. участием «Сотрудничество для решения проблемы отходов», Харьков: ИД «ИНЖЕК», 2004. – С. 177-179.
8. Бикбулатов И.Х., Насыров Р.Р., Даминев Р.Р., Бакиев А.Ю. Способ утилизации основного отхода производства кальцинированной соды // Нефтегазовое дело, 2007. – С. 1-9.
9. Насыров Р.Р., Даминев Р.Р. Метод переработки основного отхода производства кальцинированной соды // Башкирский химический журнал, 2008. – Т. 15, №3. – С. 95-100.
10. Способ получения хлористого кальция: пат. № RU 2474536, МПК C01F11/24/ Мустафин А.Г., Воронин А.В., Садыков Н.Б., Муртазин Р.Х., Мухаметов А.А., Шарипов Т.В. заявитель и патентообладатель Мустафин А.Г. - № 2011143536/05; заявл. 27.10.2011; опубл. 10.02.2013.
11. Способ получения хлористого аммония: пат. № RU 2495824, МПК C01C1/16/ Мухаметов А.А., Мустафин А.Г., Воронин А.В., Садыков Н.Б., Мухаметов А.А. заявитель и патентообладатель

тель Мустафин А.Г. - № 2012101375/05; заявл. 13.01.2012; опубл. 20.03.2013.

12. Зайцев И.Д., Ткач Г.А., Стоев Н.Д. Производство соды. - М., Химия, 1986. - 312 с.

## References

1. Grigoryev Yu.S. *Metodika izmereniy opticheskoy plotnosti kultury vodorosli khlorella (Chlorella vulgaris Beijer) dlya opredeleniya toksichno-sti pityevykh. presnykh prirodnnykh i stochnykh vod. vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya* [Methodology for measuring the optical density of the culture of the chlorella (*Chlorella vulgaris Beijer*) algae to determine the toxicity of drinking, fresh natural and waste water, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste], Moscow, 2004, 37 p.
2. Grigoryev Yu.S., Shashkova T.L. *Metodika izmereniy kolichestva dafniy (Daphnia magna Straus) dlya opredeleniya toksichnosti pityevykh. presnykh prirodnnykh i stochnykh vod, vodnykh vytyazhek iz gruntov, pochv, osadkov stochnykh vod, otkhodov proizvodstva i potrebleniya metodom pryamogo scheta* [Methodology for measuring the amount of daphnia (*Daphnia magna Straus*) to determine the toxicity of drinking, fresh natural and waste waters, water extracts from soils, soils, sewage sludge, production and consumption waste by the direct counting method], Moscow, 2006, 39 p.
3. Kozlov S.G., Vyazovikova I.V., Chernyj S.A., Krepysheva I.V. *Ispol'zovanie othodov sodovogo proizvodstva v dorozhnom stroitel'stve* [Use of soda production waste in road construction], *Fundamental'nye issledovaniya. Tekhnicheskie nauki*, 2013, No. 10, pp. 2604-2611.
4. Manojlo E.V., Manojlo YU.A., Kamburg V.G., Moiseev V.F. *Primenenie othodov sodovogo proizvodstva v stroitel'stve* [The use of soda production waste in construction], *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*, 2012, No. 1, pp. 43-50.
5. Kalinina E.V. *Utilizaciya shlamov karbonata kal'ciya v proizvodstve tovarnykh produktov stroitel'noj otrasli* [Utilization of calcium carbonate sludge in the production of commercial products of the construction industry], *Gradostroitel'naya i otraslevaya ekologiya – Vestnik PNIPU. Urbanistika*, 2012, No. 1. - pp. 97-113.
6. Sivkova D.M., Kalinina E.V. *Netradicionnye izvestkovye melioranty* [Unconventional lime ameliorants], *Modernizaciya i nauchnye issledovaniya v transportnom komplekse*, 2018, Vol. 1, pp. 96-99.
7. Mihajlova E.A., Lobjko A.Ya., Molchanov V.I., Panasenkov V.A. *Perspektivy napravleniya utilizacii othodov sodovogo proizvodstva* [Prospects for the direction of soda waste disposal]. *Tezisy dokladov konf. s mezhdunar. uchastiem «Sotrudnichestvo dlya resheniya problemy othodov»*, Har'kov: ID «INZHEK», 2004, pp. 177-179.
8. Bikbulatov I.H., Nasyrov R.R., Daminev R.R., Bakiev A.Yu. *Sposob utilizacii osnovnogo othoda proizvodstva kal'cinirovannoj sody* [Method of disposal of the main waste of soda ash production], *Neftegazovoe delo*, 2007, pp. 1-9.
9. Nasyrov R.R., Daminev R.R. *Metod pererabotki osnovnogo othoda proizvodstva kal'cinirovannoj sody* [Method of processing the main waste of soda ash production], *Bashkirskij himicheskij zhurnal*, 2008, Vol. 15, No. 3, pp. 95-100.
10. Mustafin A.G., Voronin A.V., Sadykov N.B., et al. (2013). The method of obtaining calcium chloride [Sposob polucheniya hloristogo kal'ciya]. RF Patent 2474536.
11. Muhametov A.A., Mustafin A.G., Voronin A.V., et al. (2013). The method of obtaining ammonium chloride [Sposob polucheniya hloristogo ammoniya]. RF Patent 2495824.
12. Zajcev I.D., Tkach G.A., Stoev N.D. *Proizvodstvo sody* [Soda production], Moscow, Himiya, 1986, 312 p.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.

**В журнале публикуются результаты исследований по следующим направлениям:**

- тепловые и ядерные энергетические установки;
- электротехнические комплексы и сети;
- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- экологическая безопасность;
- химические технологии атомных станций;
- информационные технологии в энергетике;
- моделирование физических процессов;
- физика в ядерной энергетике;
- автоматизация процессов контроля и управления;
- судовые энергетические установки;
- холодильные установки;
- гидравлические энергоустановки;
- компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Принимаются статьи на русском и английском языках.

**Статья должна быть структурирована и содержать:**

- постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

**К статье должно прилагаться:**

- два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, первый экземпляр, подписанный всеми авторами;
- оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
- рецензия, подписанная доктором наук или кандидатом наук;
- информация об авторах статьи (заголовки статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты);
- компакт-диск с текстовым файлом.

## ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

При подготовке статьи в журнал авторы должны руководствоваться стандартом «Оригиналы авторские и текстовые издательские» (ОСТ 29.115—88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования.

**Статья должна содержать:**

- шифр УДК; название статьи; инициалы и фамилии авторов;
- место работы каждого автора с полным почтовым адресом;
- аннотацию на русском языке (4-5 строк), отображающую цель проведенных исследований и основные результаты;
- ключевые слова;
- индекс UDC (УДК для англ. блока);
- заглавие (на английском языке);
- фамилии и инициалы авторов (на английском языке);

- место работы каждого автора с полным почтовым адресом (на английском);
- аннотация на английском языке с заголовком «Abstract»;
- ключевые слова (на английском языке, соответствующие русскоязычному набору);
- статья на языке оригинала;
- список литературных источников на русском языке (6-20 ссылок);
- список литературных источников на латинице: тот же список, что и в статье, но с транслитерацией фамилий и слов, записанных по-русски, и с переводом на английский язык неанглоязычных названий источников).

### ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ

Статья должна представляться также в электронном виде файлом, подготовленном в текстовом процессоре MS Word в режиме разметки страницы. Файл следует сохранять с расширением \*.doc(или \*.rtf) без макросов.

Имя файла должно начинаться фамилией контактирующего автора на латинице. Основной текст набирается шрифтом «Times New Roman» (11 пт) через интервал с автоматической расстановкой переносов в две колонки с расстоянием между ними 10 мм.

Ширины верхнего поля – 27 мм, нижнего – 23 мм, левого и правого – 18 мм, первый ряд — отступ 0,75 см.

Название статьи – шрифт 16 пт, ФИО – шрифт 14 пт. Сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, список литературы – шрифт 10 пт.

Рисунки выполняются в графических редакторах и (или) процессорах (Paint, PhotoShop, CorelDraw и т.п.) в с разрешением 300dpi.

Шаблон статьи и требования по ее оформлению приведены на сайте СевГУ: <https://www.sevsu.ru/>.

Статьи, не удовлетворяющие шаблону и требованиям к оформлению, рассматриваться не будут.

Более детальную информацию можно получить в редакции журнала:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация. E-mail [nauchnyyzhurnal@mail.ru](mailto:nauchnyyzhurnal@mail.ru), телефон. +7(8692) 71-01-64.

**ISSN 2413-5526**

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»  
Том 7 № 3**

**SCIENTIFIC MAGAZINE  
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»  
Vol. 7 No 3**

Учредитель и издатель:

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

Адрес редколлегии:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация  
E-mail [nauchnyzhurnal@mail.ru](mailto:nauchnyzhurnal@mail.ru)  
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова.*

---

Подписано к печати 30.09.2021. Изд. № 14/21. Зак. 25/21. Тираж 65 экз.  
Объем 13,5 п.л. Усл. печ. л. 12,55. Уч.-изд. л. 13,23. Формат бумаги 60 x 84 1/8

---

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»