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. 6 № 1

Севастополь
2020

Э 651 ISSN 2413-5526
УДК 621.311

Э 651 **Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2020. – Т. 6. - № 1. – 184 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.

Р е д а к ц и о н н а я к о л л е г и я:

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;
Тимощенко А.И., д.т.н., профессор; *Карницкий А.Б.*, д.т.н., профессор;
Высоцкий В.Е., д.т.н., профессор; *Краснодубец Л.А.,* д.т.н., профессор;
Прибатурин Н.А., д.т.н., профессор; *Кирияченко И.А.,* к.т.н., профессор;
Магдыч Е.А., к.т.н., доцент; *Федорова С.А.,* к.пед.н., доцент;
Мирошниченко С.Т., к.т.н., доцент; *Свириденко И.И.,* к.т.н., доцент;
Матузаев К.Б., к.т.н., доцент; *Скидан А.А.,* к.т.н., доцент;
Углов А.В., к.т.н., доцент; *Шайтор Н.М.*, к.т.н., доцент;
Ерофеев В.А., к.т.н., доцент; *Ожиганова М.И.*, к.т.н., доцент;
Гусева Е.В., к.т.н., доцент; *Щекатурина Т.Л.,* д.х.н., доцент

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

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

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

© Издание ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», 2020

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки **7**

Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Мерзликин Г.Я., Сукрушев А.В. Анализ безопасности ЯЭУ с ВВЭР-1000 при разрыве паропровода большого диаметра 7

Браславский Ю.В. О возможности обеспечения безопасности ядерной установки с ВВЭР при резком снижении расхода теплоносителя через активную зону 12

Качур С.А., Давиденко Е.Н., Манжула К.А., Азаров И.И. Локализация теплогидравлических аномалий в активной зоне реакторов некипящего типа на основе корреляционного анализа акустических шумов 17

Пухлий В.А., Пухлий К.В. Термоупругость охлаждаемых рабочих лопаток с полками газотурбинных установок 22

Шаповаленко В.В. Причины повреждения тепловыделяющей сборки и возможность её ремонта на АЭС 36

Шаповаленко В.В., Матузаев К.Б., Аникевич К.П. Каким быть ядерному топливу в новых проектах ВВЭР? 40

Автоматизация процессов контроля и управления **46**

Кузнецова Н.И., Баканов Д.В. Оценка надежности систем диагностирования АСУ ТП АЭС и методы её повышения 46

Скрябина Е.В., Корнеева Н.К., Пичугова Л.Н., Моисеев Д.В., Михайлова О.С. Разработка системы исследований поведения механических образцов с использованием компьютера 53

Титаренко О.Н., Муртазаев И.А Цифровые подстанции – важный элемент интеллектуальной энергосистемы 58

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии **64**

Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., АбдАли Л.М., Аль-Руфаи Ф. М, Исса Х. А. Геотермальная установка для выработки тепловой и электрической энергии 64

Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Каширин Д.А. Установка трекерных систем для повышения генерации электрической энергии солнечными батареями 71

Электротехнические комплексы и системы **77**

Рясков Ю.И., Шайтор Н.М., Горпинченко А.В. Релейная защита электрических машин в энергетических системах и комплексах 77

Смирнов В.В., Яковенко Н.А. Релейная защита и автоматика – проблемы и перспективы развития в электроэнергетической системе России 83

Смирнов В.В., Яковенко Н.А Перспективы применения провода типа «Z» в электрохозяйстве России 88

Старченко М.А., Кочетов И.А., Старченко Т.С., Кувшинов В.В., Абейдулин С.А Применение биогазовых установок с коллекторным водонагревателем в Республике Крым 93

Химические технологии **99**

Матузаева О.В., Чернявская С.А., Третьякова Л.В., Рипп А.Г., Гайдук С.В. Математические методы исследования скорости испарения жидкости 99

Мирошниченко С.Т., Пухлий В.А., Ильчевский Р.А., Марунич В.А., Пантель В.О. Применение метода абсорбции для очистки газовоздушных выбросов 105

Тверская С.Е., Истомин В.И., Хлебникова В.В. Методика расчета аэродинамического сопротивления судового газоочистителя (скруббера) 118

Черкашина Н.И., Ерофеев В.А., Разина В.А. ,Тарасевич Д.В. Расчетно-экспериментальное исследование радиационно-защитных свойств легкоплавких композитных материалов 125

Черкашина Н.И. Адсорбционные характеристики сорбента на основе рисовой шелухи при извлечении железа в одиночных и двоичных системах 131

Черкашина Н.И. Оценка эффективности фильтрации сорбентов на основе органического сырья 138

Экологическая безопасность **145**

Заблоцкая Е.В., Кучерик Г.В., Шевцова И.В. Обращение с отходами производства и потребления на предприятии АО «КВКЗ «Бахчисарай» 145

Заблоцкая Е.В. Пути снижения негативного воздействия транспортных систем РФ на окружающую среду безопасности судов путем рециркуляции части выпускных газов дизелей 153

Косовская М.А., Лямина Н.В., Хренова Т.К., Каширина Е.С. Оценка состояния атмосферного воздуха примагистральных территорий г. Севастополя 159

Косовская М.А., Лямина Н.В. Анализ состояния атмосферного воздуха ООПТ, на примере природного парка регионального значения «Максимова дача» 165

Кучерик Г.В., Омельчук Ю.А. Ресурсосберегающие технологии снижения уровня минерализации в водооборотных системах 172

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant **7**

Braslavskiy Yu.V., Matuzaev K.B, Merzlikin G. Ya., Sukrushev A.V. Safety Analysis of Nuclear Installation with WWER-1000 in Case of large diameter steam pipe rupture 7

Braslavskiy Yu.V. WWER Nuclear Installation Safety Precautions in Case of a Sharp Coolant Flow Rate Decrease 12

Kachur S.A., Davidenko E.N., Manzhula K.A., Azarov I.I. Localization of thermohydraulic anomalies in the core of non-boiling type reactors based on correlation analysis of acoustic noise 17

Pukhliy V.A., Pukhliy K.V. Thermoelasticity of cooled blades with shelves of gas turbine installations 22

Shapovalenko V.V. Causes of damage to the fuel Assembly and expediency of its repair at nuclear power plants 36

Shapovalenko V.V., Matuzaev K.B. ,Anikevich K.P. What nuclear fuel will be used in VVER nuclear reactors? 40

Process automation and control **46**

Kuznetsova N.I. ,Bakanov D.V. Evaluation of reliability of NPP APCS diagnostics systems and methods of its enhancemen 46

Skryabina E.V.,Korneeva, N.K., Pichugova, L.N., Moiseev D.V., Mikhajlova O.S. Development of a system for investigating the behavior of mechanical samples using 53

Titarenko O.N., Murtazayev I. A. Digital substations are an important element of the smart grid 58

Alternative and renewable energy sources **64**

Kuvshjnov V.V., Kakyshina E.G., AbdAli L.M., Al-Rufai F. M, Issa H.A. Geothermal plant for generating heat and electricity 64

Kuvshjnov V.V., Kakyshina E.G., Kashirin D.A. Installation of tracker systems to increase generation electric energy solar panels 71

Electrotechnical complexes and systems **77**

Rjaskov Y.I., Shaytor N.M., Gorpinchenko A.V. Relay protection of electric machines in power systems and complexes 77

Smirnov V.V. ,Iakovenko N.A. Relay protection and automation - problems and prospects of development in the electric power system of Russia 83

Smirnov V.V. ,Iakovenko N.A. Prospects of "Z" type wire application in the Russian electrical engineering 88

Starchenko M.A., Kochetov I.A. , Starchenko T.S., Kuvshinov V.V., Abeydulin S.A. The use of biogas plants with a collector water heater in the Republic of Crimea 93

Chemical technology of nuclear power plants **99**

Matuzaeva O. V., Chernyavskaya S. A., Tretyakova L. V., RIPP A. G., Gai-

duk S. V. Mathematical methods for studying the rate of liquid evaporation 99

Miroshnichenko S.T., Pukhliy V.A., Ilchevsky R.A., Marunich V.A., Pantel V.O. Application of the absorption method for the purification of gas emissions 105

Tverskaya S.E., Istomin V.I., Hlebnikova V. V. Method for calculating the aerodynamic drag of a ship gas scrubber (scrubber) 118

Cherkashina N.I., Erofeev V.A., Rasina V.A., Tarasevich D.V. Computational and experimental study of radiation-protective properties of low-melting composite materials 125

Cherkashina N.I. Adsorption characteristics of rice sorbent iron husks extraction in single and binary systems 131

Cherkashina N.I. Assessment of the efficiency of filtration of sorbents based on organic raw materials 138

Environmental Safety **145**

Zablotskaya E.V., Kucherik G.V., Shevcova I.V. Waste management of production and consumption at the enterprise JSC "CRAC "Bakhchisaray» 145

Zablotskaya E.V. Ways to reduce the negative impact of transport systems in the Russian Federation on the environment 153

Kosovskaya M.A., Lyamina N.V., Hrenova T.K., Kashirina E.S. Analysis of the condition of atmospheric air of the main highways in Sevastopol 159

Kosovskaya M.A., Lyamina N.V. Assessment of the state of atmospheric air in a natural park of regional significance «Maximov dacha» 165

Kucherik G.V., Omelchuk Yu.A. Resource-saving technologies for reducing the mineralization level in water-circulation systems 172

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК.621.039.586

Анализ безопасности ЯЭУ с ВВЭР-1000 при разрыве паропровода большого диаметра

Ю.В. Браславский[1], К.Б. Матузаев[2], Г.Я. Мерзликин[3], А.В. Сукрушев[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]a1a67@yandex.ru, [2]matuzaev@mail.ru, [3]merzlikin2019@yandex.ru, [4]sukrushev1949@yandex.ru

Статья поступила 15.01.2020 г. ; после доработки 17.01.2020 г..

Аннотация

Безопасность ядерной установки является одним из важнейших аспектов при проектировании и строительстве атомного энергоблока. При этом важно знать, как различные отказы отдельных элементов могут повлиять на безопасность установки в целом. В статье выполнена оценка безопасности ядерной энергетической установки с реактором ВВЭР-1000 в случае разрыва паропровода второго контура при различных вариантах места разрыва относительно отсечных устройств.

Ключевые слова: ядерная установка, водо-водяной реактор, безопасность, главные паропроводы

Safety Analysis of Nuclear Installation with WWER-1000 in Case of large diameter steam pipe rupture

Yu.V. Braslavskiy[1], K.B Matuzaev[2], G. Ya. Merzlikin[3], A.V. Sukrushev[4]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]a1a67@yandex.ru, [2]matuzaev@mail.ru, [3]merzlikin2019@yandex.ru, [4]sukrushev1949@yandex.ru

Received 15.01.2020 y. ; received in final form 17.01.2020 y.

Abstract

Nuclear installation safety is of high priority during nuclear power plant unit designing and construction. In such a case, it is important to be aware of various equipment failures which can threaten nuclear installation safety. Therefore safety of nuclear installation with WWER-1000 in case of large diameter steam line rupture with different variants of the gap location relative to the cut-off devices

Keywords: nuclear installation, WWER type reactor, safety, main steam lines

Введение

При работе ядерной энергетической установки (ЯЭУ) с реактором ВВЭР-1000 в парогенераторах вырабатывается большое количество пара, имеющего достаточно высокие параметры (температуру и давление). Поэтому трубопроводы, через которые этот пар передается в турбину, учитывая значительное количество сварных соединений, подвергаются существенным нагрузкам, и вероятность неплотности (разрыва) паропровода большого диаметра растет по мере увеличения их срока эксплуатации[1].

При этом, несмотря на достаточно надежное разделение первого и второго контуров ЯЭУ с ВВЭР, неплотность второго контура (паропровода) оказывает существенное негативное влияние на безопасность реактора и всей установки в целом.

Это влияние заключается в резком увеличении теплоотвода от первого контура и, соответ-

ственно, активной зоны реактора, которое обусловлено падением давления (температуры насыщения) второго контура [2].

Определяющее значение при подобной аварии имеет скорость падения давления во втором контуре, которая определяется величиной разрыва (эквивалентным диаметром) паропровода. Также важным фактором, характеризующим аварию, является место разрыва паропровода. Т. к. на паропроводах от каждого парогенератора (ПГ) установлены быстродействующие запорно-отсечные клапаны (БЗОК), то возможны различные сценарии протекания аварии и, соответственно, действия оператора [3].

В любом случае, увеличение отвода тепла от активной зоны реактора приведет к выделению положительной реактивности в ней, воздавая условия для перегрева и повреждения оболочек наиболее энергонапряженных топливных элементов (ТВЭЛ).

Поэтому оценка безопасности всей ЯЭУ является достаточно важной для определения надежности установки при возникновении проектных аварийных ситуациях.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью выполняемого исследования является проведение оценки безопасности ядерной энергетической установки с ВВЭР-1000 при разрыве паропровода второго контура большого диаметра.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- определить начальные условия для проведения анализа;
- выполнить моделирование рассматриваемой ситуации;
- оценить влияние моделируемого отказа на общую безопасность ЯЭУ.

Выбор начальных условий для проведения эксперимента

В ходе исследований рассматривалась проектная авария, исходное событие которой привело к увеличению теплоотвода от первого контура. Сценарий протекания аварии определялся местом разрыва паропровода.

В качестве исходного события принят мгновенный разрыв паропровода парогенератора полным сечением.

Параметры стационарного режима ЯЭУ приведены в табл. 1.

Таблица 1. *Основные параметры РУ*

Параметр	Численное значение
Тепловая мощность реактора, МВт	3000
Давление в первом контуре, МПа	15,7
Температура теплоносителя на входе в реактор, °С	291
Минимальный расход теплоносителя через реактор, $м^3/ч$	80000
Протечки теплоносителя мимо активной зоны, %	3
Давление в парогенераторе, МПа	6,3
Температура питательной, воды подаваемой в парогенератор, °С	220

Моделирование выполнялось для конца топливной кампании, характеризующейся максимальной неравномерностью поля энерговыделения в активной зоне. Момент кампании определялся, исходя из получения максимальной положительной реактивности, вносимой в активную зону в результате захолаживания теплоносителя первого контура. Также для моделирования более «жесткого» протекания режима с точки зрения охлаждения ТВЭЛ рассматривался вариант с наложением потери электропитания собственных нужд АЭС. При этом потеря электропитания консервативно принималась за 1,9 с до срабатывания аварийной защиты реактора (АЗ). Время 1,9 с обусловлено задержкой на формирование сигнала по обесточиванию, принятой равной 1,4 с, а также временем на прохождение сигнала по цепям – 0,5 с.

В ходе анализа были рассмотрены два варианта сопутствующих исходных событий:

1. Для анализа безопасности рассматривался разрыв паропровода ПГ-3 в неотсекаемой части – на участке до БЗОК по ходу пара, что приводит к невозможности отсечения аварийного парогенератора от течи. Истечение из неаварийных ПГ отсутствует вследствие наличия обратного клапана на паропроводе ПГ-3. Для получения наиболее консервативных параметров теплоносителя на входе в реактор и значений давления первого и второго контуров приняты независимые от исходного события отказы блочной редукционной установки для сброса пара в атмосферу (БРУ-А) на паропроводе ПГ-4 и первого импульсно-предохранительного устройства (ИПУ) ПГ-4.

2. Для анализа возможности возникновения повторной критичности в результате захолаживания теплоносителя первого контура рассматривался разрыв паропровода на участке после обратного клапана по ходу пара. Это приводит, с

учетом принятого отказа БЗОК на аварийном ПГ, к истечению пара из всех ПГ до достижения уставок закрытия БЗОК на паропроводах неаварийных парогенераторов. Задержка на закрытие БЗОК задержкой принята равной 10 с. Также для получения наиболее консервативных результатов введен отказ блокировки на запрет подачи питательный воды в аварийный ПГ-3, что, совместно с отказом БЗОК, определяет возможность более глубокого захолаживания теплоносителя первого контура и внесение положительной реактивности.

В обоих вариантах исследований работа системы аварийного впрыска бора смоделирована в консервативном приближении, подразумевающим что раствор борной кислоты подается одним насосом с минимальным расходом, 100 м^3/ч, в неаварийную петлю в течении 540 с, до опорожнения бака.

Кроме того, было принято допущение, что действия оператора, направленные на управление ситуацией, начинаются через 30 минут после возникновения аварии.

Таким образом, принятые допущения позволяют получить достаточно консервативный вариант исследуемого отказа для анализа безопасности ЯЭУ.

Анализ безопасности ЯЭУ при разрыве паропровода большого диаметра

В ходе выполнении эксперимента использовалась прототипная модель ядерной установки, ВВЭР-1000 (В-320). При этом моделирование выполнялись в программном коде RELAP-5.

Анализ степени безопасности ядерной установки выполнялся на основании критериев, подобных приемочным критериям ЯЭУ на этапе проектирования:

- минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи с вероятностью не менее 95 % должен быть не менее 1,0;
- давление в обоих контурах ядерной установки не должно превышать расчетное значение, больше, чем на 15 %;
- плавление топлива недопустимо, что должно быть подтверждено следующими характеристиками: температура «выгоревшего» топлива не должна превышать 2570 °С, температура «свежего» топлива – не более 2840 °С;
- локальная глубина окисления оболочек ТВЭЛ не должна превышать 18 % от первоначальной толщины оболочки;
- не допускается повторный выход реактора в критическое состояние (повторная критичность).

При проведении расчета было получено, что в результате мгновенного полного разрыва паропровода (рисунок 1) срабатывает аварийная защита реактора по сигналам снижения уровня в аварийном парогенераторе и прекращению подачи в него питательной воды, а также «разрывной» защиты второго контура (рисунки 2, 3), после чего, расхолаживание реакторной осуществляется при помощи неаварийных парогенераторов.

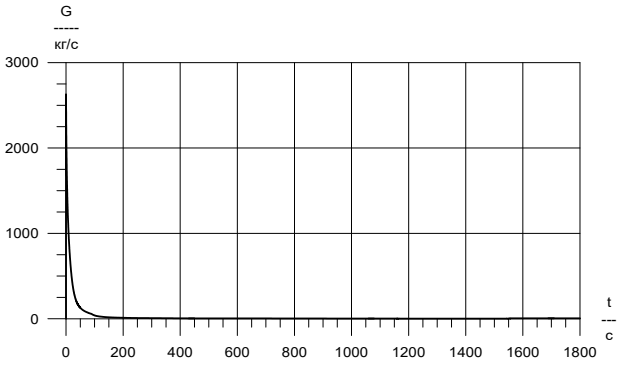


Рис. 1. Расход в течь

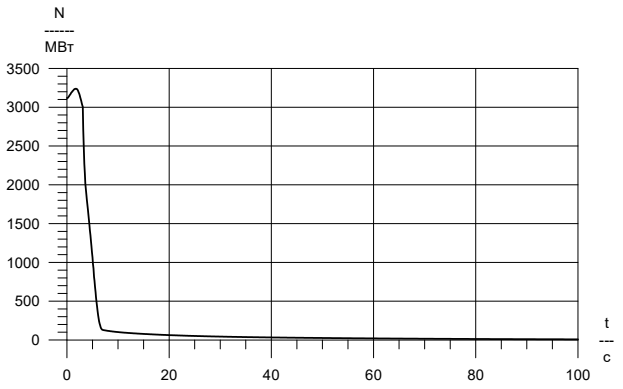


Рис. 2. Тепловая мощность реактора после срабатывания АЗ

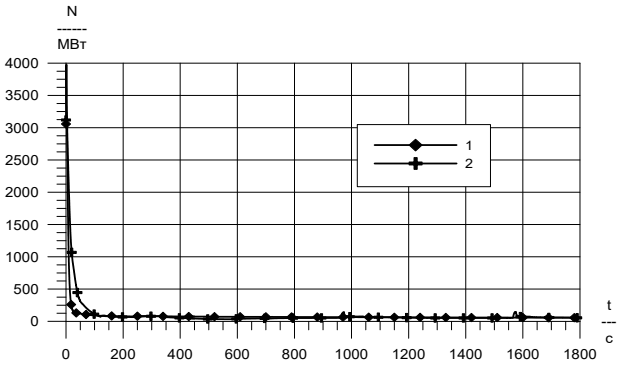


Рис. 3. Разрыв паропровода до БЗОК:
1 – мощность, отведенная от ТВЭЛ;
2 – мощность, переданная во второй контур

По сигналу потери электропитания собственных нужд энергоблока осуществляется запуск дизель-генераторов с последовательным подключением потребителей по программе ступенчатого пуска.

В результате потери электропитания происходят следующие события:

- закрытие стопорных клапанов турбины;
- прекращение подачи питательной воды в парогенераторы;
- отключение всех главных циркуляционных насосов;
- отключение систем нормальной подпитки первого и второго контуров;
- отключение блочных редукционных установок для сброса пара в конденсатор (БРУ-К);
- отключение систем впрыска и нагревателей компенсатора давления.

В случае разрыва паропровода до обратного клапана (вариант 1) максимальное давление в аварийном парогенераторе будет ограничено работой паросбросных устройств (рисунок 4).

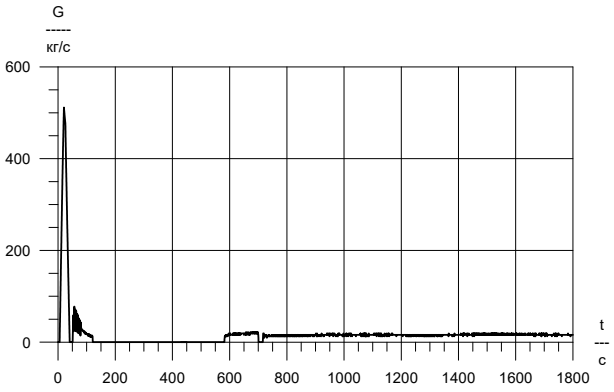


Рис. 4. Суммарный расход через БРУ-А

В случае разрыва паропровода в неотсекаемой части произойдет осушение аварийного ПГ и снижение давления в нем до давления окружающей среды (рисунки 5, 6).

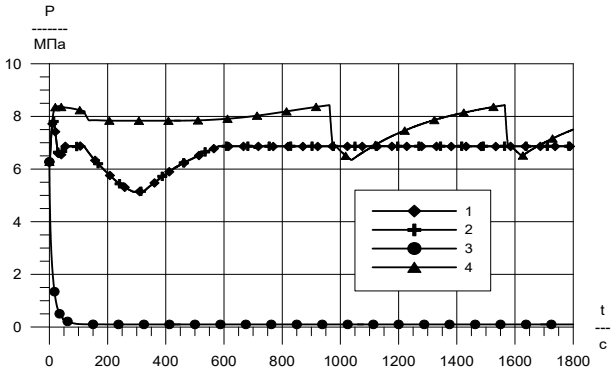


Рис. 5. Давление в парогенераторах:
1 – ПГ-1; 2 – ПГ-2; 3 – ПГ-3; 4 – ПГ-4

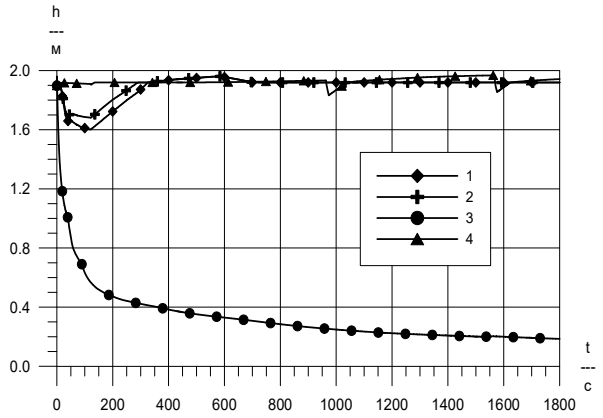


Рис. 5. Давление в парогенераторах:
1 – ПГ-1; 2 – ПГ-2; 3 – ПГ-3; 4 – ПГ-4

Разрыв паропровода после обратного клапана (вариант-2) приведет к невозможности отсечения неаварийных парогенераторов от участка разрыва до снижения в них давления ниже значения уставки на закрытие БЗОК.

В этом случае расхолаживание будет осуществляться посредством сброса пара в атмосферу через БРУ-А. Максимальное давление в аварийном парогенераторе также будет ограничено работой паросбросных устройств.

Протекание режима до срабатывания аварийной защиты реактора аналогично первому варианту. Максимальные значения температур оболочки и топлива, минимальное значение коэффициента запаса до кризиса теплообмена, моменты времени достижения экстремальных параметров равны значениям первого варианта.

Подача аварийной питательной воды во все ПГ начинается на 123 с режима.

По мере восстановления уровня в парогенераторах происходит перераспределение расхода питательной воды от трех аварийных питательных насосов, в результате чего в аварийный ПГ-3 подается максимальное количество воды – 450 $м^3$/ч.

Непрекращающееся в результате отказа БЗОК истечение среды из ПГ-3 (с учетом подачи аварийной питательной воды) приводит к постоянному захолаживанию теплоносителя первого контура со скоростью примерно 290 ºС/ч. В результате снижения температуры теплоносителя в активную зону вносится положительная реактивность.

Подача от одного насоса ЦН 150-110 системы аварийного ввода бора высокого давления в холодную нитку второй петли приводит к увеличению концентрации бора в теплоносителе, и после 1400 с суммарная реактивность активной зоны начинает снижаться (рисунок 6).

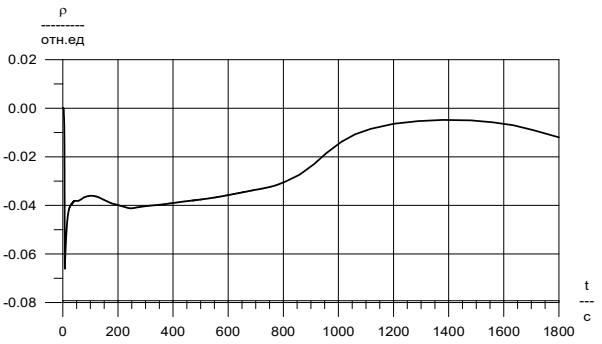


Рис. 6. Реактивность

Условий для возникновения паро-циркониевой реакции не возникает. Минимальное значение коэффициента запаса до кризиса теплообмена достигается на 2,6 с режима и составляет 1,5 (рисунок 7).

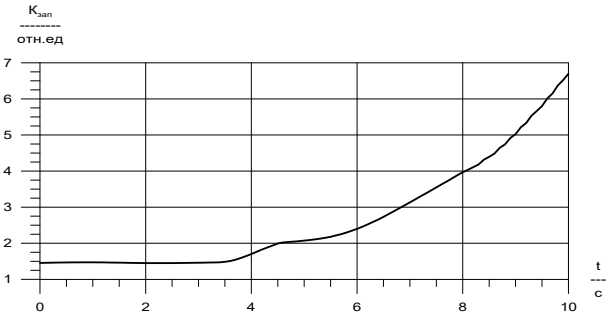


Рис. 7. Коэффициент запаса до кризиса телопобмена

Максимальные температуры топлива и оболочки ТВЭЛ не превышают своих первоначальных значений и равны соответственно 1863 °С и 350 °С (рисунки 7,8).

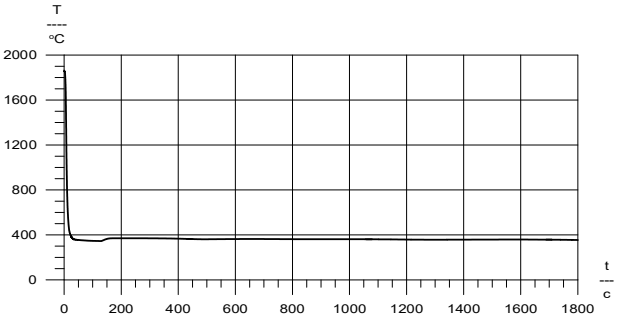


Рис. 8. Максимальная температура топлива

Максимальное достигнутое значение суммарной реактивности активной зоны после срабатывания АЗ равно минус 0,005. К 1800 с режима подкритичность активной зоны составляет 0,01. Условия для повторного выхода реакторной установки в критическое состояние отсутствуют.

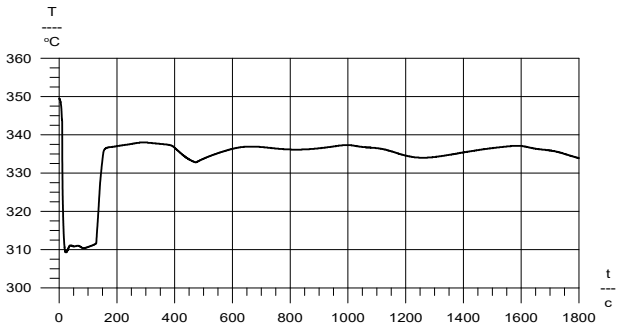


Рис. 8. Максимальная температура оболочки ТВЭЛ

Заключение

Проведенные исследования по анализу безопасности ядерной установки с ВВЭР-1000 при разрыве паропровода большого диаметра показали следующие результаты:

- принятые в исследовании допущения позволяют получить достаточно консервативный вариант исследуемого отказа для анализа безопасности ЯЭУ;
- результаты исследований показали, что при принятых исходных данных, начальных и граничных условиях обеспечивается выполнение критериев, характеризующих безопасность ядерной установки.

Список литературы

1. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС: Учебник для вузов / В.А. Иванов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургсоке отд-ние. 1994. – 384 с., ил.
2. Зорин В.М. Атомные электростанции: учебное пособие / В.М. Зорин. – М.: издательский дом МЭИ, 2012. – 673 с.: ил.
3. Выговский С.Б. Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, Е.В. Чернов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 304 с.

References

1. Ivanov V.A. *Ekspluatatsiya AES: Uchebnik dlya vuzov* [Operation of NPP: Textbook for high schools]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1994, 384 p.
2. Zorin V.M. *Atomnye electrostantsii: uchebnoe posobie* [Nuclear power plants: textbook]. Moscow, MEI Publ, 2012, 673 p.
3. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Chernov E.V. *Bezopasnost i zadachi inzhenernoy podderzhki ekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [Safety and issues of the WWER nuclear installation operation engineer assistance]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2013, 304 p.

УДК.621.039.586

О возможности обеспечения безопасности ядерной установки с ВВЭР при резком снижении расхода теплоносителя через активную зону

Ю.В. Браславский
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия.
a1a67@yandex.ru,

Статья поступила 7.02.2020 г. ; после доработки 11.02.2020 г..

Аннотация

Обеспечение надежного охлаждения активной зоны реактора при его работе на любом уровне мощности – обязательное условие для безопасной работы ядерной установки и всей АЭС в целом. При этом могут возникнуть ситуации, когда расход охлаждающей среды через активную зону резко уменьшится. В статье выполнен анализ возможности обеспечения охлаждения активной зоны ВВЭР-1000 при мгновенном прекращении расхода теплоносителя в одной из петель первого контура.

Ключевые слова: ядерная установка, водо-водяной реактор, теплоноситель, главный циркуляционный насос

WWER Nuclear Installation Safety Precautions in Case of a Sharp Coolant Flow Rate Decrease

Yu.V. Braslavskiy,
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
a1a67@yandex.ru,

Received 7.02.2020 y.; received in final form 11.02.2020 y.

Abstract

Effective core cooling is imperative for the secure operation of both nuclear installation and NPP. However, coolant flow rate through the core can decrease sharply. Thus the possibility of WWER-1000 core cooling in case of this situation in one of the primary loops is analyzed in the article.

Keywords: nuclear installation, WWER type reactor, safety, coolant, main circulation pump

Введение

При работе реакторной установки на любом уровне мощности для нормального отвода тепла от тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) необходим достаточный расход теплоносителя через активную зону реактора. Этот расход, как правило, обеспечивается работой главных циркуляционных насосов (ГЦН), основные характеристики которых (давление и напор) позволяют поддерживать температуру ядерного топлива и, соответственно, оболочек ТВЭЛ в допустимых пределах на любом проектном уровне мощности реакторной установки. [1]

Как известно, ядерная энергетическая установка (ЯЭУ) с водо-водяным энергетическим реактором ВВЭР-1000 содержит в своем составе четыре ГЦН, непрерывно функционирующих при работе реактора на номинальном уровне мощности.

Если по какой-либо причине произошло незапланированное отключение одного или нескольких ГЦН, специально предусмотренные средства автоматики обеспечат снижение мощности реактора до величины, при которой расхода оставшихся в работе ГЦН будет достаточно для отвода тепла от активной зоны. [2]

В то же время, следует помнить, что действия системы автоматического управления и защиты реактора по частичному снижению мощности реактора не происходят мгновенно, и в этот сравнительно небольшой промежуток времени, когда ГЦН отключился, а мощность реактора еще снизилась до нужной величины, возможен локальный перегрев наиболее энергонапряженных ТВЭЛ.

Для предотвращения указанного явления в конструкции ГЦН ЯЭУ с ВВЭР-1000 предусмотрен специальный элемент – маховик, позволяющий увеличить инерционность вращательного движения насоса агрегата (время выбега), в течение которого ГЦН будет выполнять свою функцию подачи воды, хотя и не в полном объеме.

Также возможны ситуации, когда расход теплоносителя от ГЦН снизится до нуля практически мгновенно. Такая ситуация получила название «заклинивание ГЦН». Это возможно при попадании посторонних предметов в проточную часть насоса, механического повреждения его рабочего колеса, а также при расцеплении валов насоса и его электродвигателя, на котором установлен маховик.

Главная опасность подобной аварии заключается в отсутствии времени выбега насоса, достаточного для снижения мощности реактора. Несмотря на предусмотренное проектом данного типа ЯЭУ срабатывание аварийной защиты реактора, перегрев и повреждение наиболее энергонапряженных ТВЭЛ представляется достаточно вероятным, т. к. зависит от многих факторов (момента кампании, аксиального распределения энерговыделения и т. д.).

Постановка цели и задач научного исследования

Целью проводимого исследования является анализ методов обеспечения надежного теплоотвода от активной зоны ВВЭР-1000 при мгновенном прекращении расхода теплоносителя в одной из петель первого контура.

Для выполнения поставленной цели необходимо решить следующие научные задачи:

- определить начальные условия для проведения анализа;
- рассмотреть возможные пути управления аварией, выполнив при этом моделирование указанной ситуации с достаточной точностью;
- оценить эффективность предлагаемых мер по обеспечению охлаждения активной зоны.

Определение начальных условий для проведения анализа

При исследовании рассматривался режим мгновенного заклинивания или обрыв вала одного главного циркуляционного насоса в результате механического повреждения в конструкции. Подобная ситуация, как уже отмечалось, является аварийной и обуславливает резкое снижение расхода теплоносителя через активную зону. Предполагается, что отказ произошел на номинальной мощности реактора.

Для повышения консервативности наряду с заклиниванием одного ГЦН рассматривался ряд сопутствующих условий и отказов:

1. Обесточивание ядерной установки в начальный момент аварии как наиболее неблагоприятный с точки зрения максимальной температуры оболочки ТВЭЛ.

2. Регулятор мощности реактора функционировал в режиме поддержания постоянной нейтронной мощности до момента срабатывания аварийной защиты (АЗ) реактора.

3. Не учитывалась работа некоторых автоматических устройств, не оказывающих существенного влияния на достоверность полученных результатов: устройства разгрузки и ограничения мощности реактора, предупредительных защит первого и второго рода, блочной редукционной установки сброса пара в конденсатор, вспомогательных питательных насосов, а также системы продувки-подпитки и борного регулирования.

4. Несрабатывание одного предохранительного устройства, выполняющего сброс пара в атмосферу (БРУ-А).

5. Отказ одного дизель-генератора, который приводит к отказу одного канала аварийной питательной воды. В итоге в работе остаются два канала этой системы с подключением к четырем парогенераторам.

Кроме того, в расчете было принято, что открытие БРУ-А, и предохранительных устройств парогенератора (ИПУ ПГ) происходит с задержкой в 2 с от момента достижения уставки срабатывания, из которых 1,5 с отводится инерционность измерительных преобразователей, а 0,5 с составляет время прохождения сигнала по электрическим цепям.

Таким образом, принятые начальные условия позволяют провести исследование достаточно консервативной ситуации, обусловленной резким снижением расхода теплоносителя через активную зону реактора.

Оценка эффективности принятых мер по обеспечению безопасности ЯЭУ

При проведении исследований использовалась модель ядерной установки, прототипом которой является ЯЭУ ВВЭР-1000 (модификация В-320). При этом расчеты осуществлялись при помощи программного кода RELAP-5.

Заклинивание ГЦН моделировалось при работе реактора на уровне мощности 104 % от номинальной, что соответствует современным реалиям для отечественных ядерных установок такого типа. Тепловая мощность реактора при этом составляет 3120 МВт. Расход теплоносителя через активную зону реактора, обеспечиваемый четырьмя работающими ГЦН, равен 80000 м^3/ч.

При проведении анализа были рассмотрены изменения параметров реакторной установки для двух аксиальных распределений энерговыделения: с максимумом в середине активной зоны и максимумом в верхней части активной зоны.

В указанной ситуации (с учетом обесточивания) срабатывание АЗ реактора происходит по факту отключения трех и более ГЦН. При этом тепловая мощность реактора снижается до величины остаточных тепловыделений (рисунок 1).

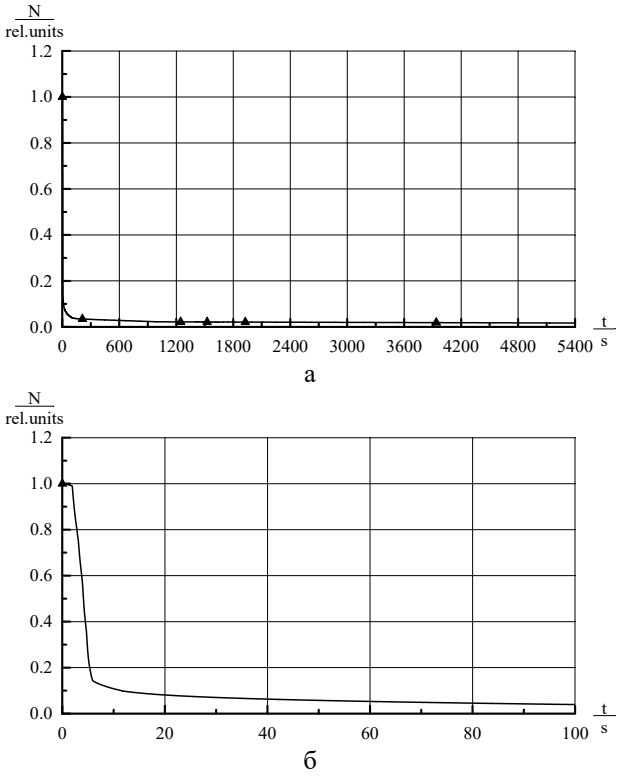


Рис. 1. Относительная мощность остаточных тепловыделений при максимуме энерговыделений:
а – в середине активной зоны; б – в верхней части активной зоны

Начальное давление в первом контуре принято равным 16 МПа.

Расход теплоносителя через реактор снижается, что вызывает увеличение температуры и давления в первом контуре (рисунок 2).

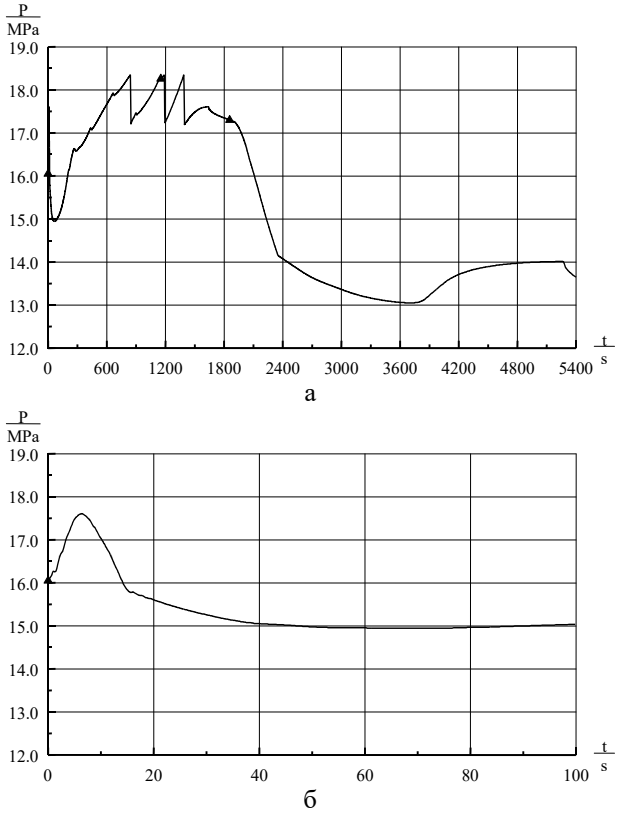


Рис. 2. Давление на выходе из активной зоны при максимуме энерговыделений:
а – в середине активной зоны; б – в верхней части активной зоны

Три исправных ГЦН обеспечивают расход через активную зону реактора за счет выбега (рисунок 3). В результате обесточивания АЭС закрываются стопорные клапаны турбогенератора, отключается подача питательной воды в ПГ, не работают БРУ-К а также электронагреватели компенсатора давления.

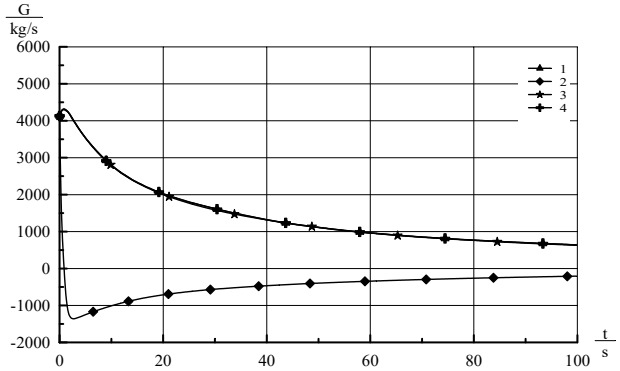


Рис. 3. Расход теплоносителя по петлям

Расчет теплогидравлической обстановки в активной зоне реактора выполнялся для максимально-напряженного канала активной зоны. Результаты расчета показали, что для максимально-напряженного канала имеет место кризис теплоотдачи, т. к. минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи меньше 1,0 (рисунок 4). Время выхода из кризиса теплоотдачи для ТВЭЛ с максимумом по середине активной зоны составило 16,7 с, для ТВЭЛ с максимумом вверху активной зоны – 15,5 с.

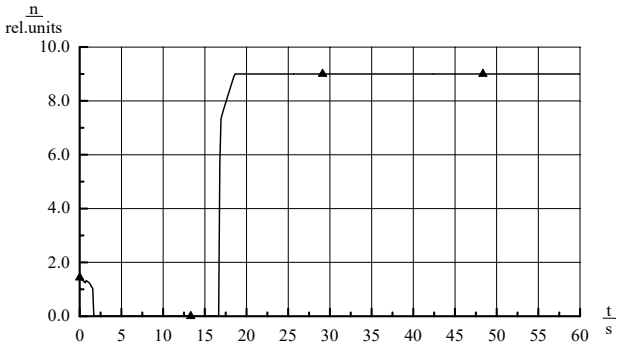
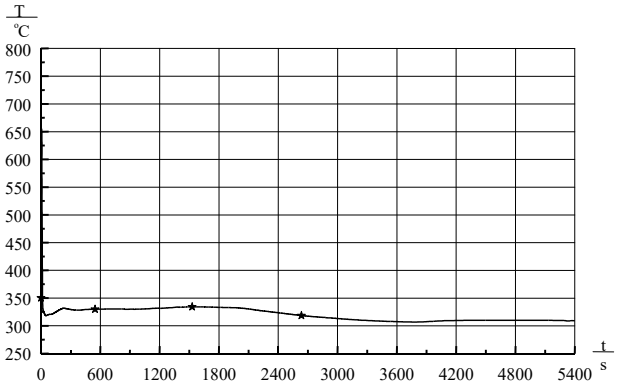


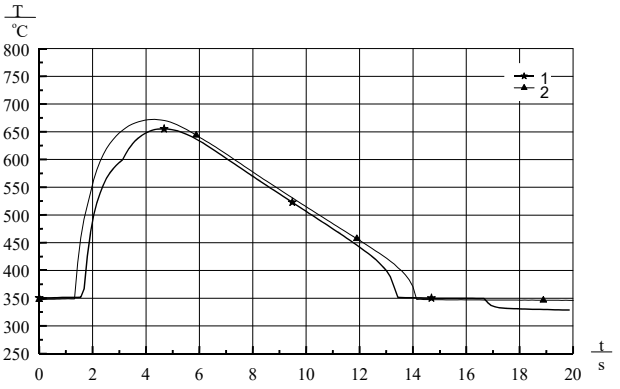
Рис. 4. Минимальный запас до кризиса теплообмена

При этом максимальная температура оболочки ТВЭЛ с аксиальным распределением энерговыделения с максимумом в середине активной зоны составила 655,4 °С, а с максимумом вверху активной зоны – 598,7 °С (рисунок 5). Максимальная температура топлива для указанных ТВЭЛ составила 1828 и 1564,2 °С, соответственно (рисунок 6).

Максимальная радиально усредненная энтальпия топлива для ТВЭЛ с аксиальным распределением энерговыделения с максимумом в середине активной зоны составила 432,2 Дж/г, для ТВЭЛ с аксиальным распределением энерговыделения с максимумом вверху активной зоны – 376,6 Дж/г (рисунок 7).

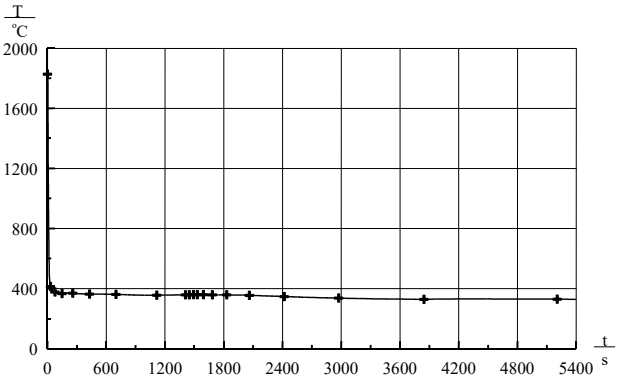


а

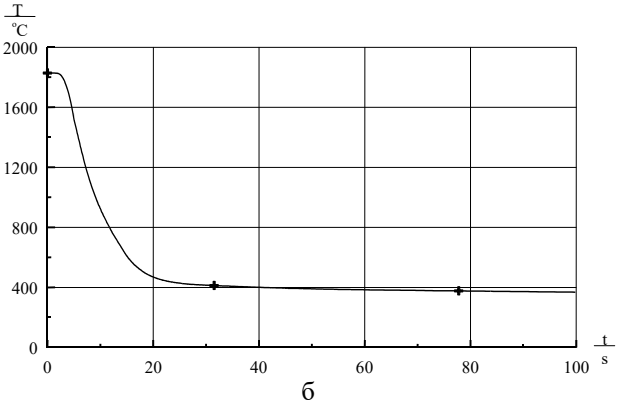


б

Рис. 5. Максимальная температура оболочек ТВЭЛ при максимуме энерговыделений:
а – в середине активной зоны; б – в верхней части активной зоны



а



б

Рис. 6. Максимальная температура топлива при максимуме энерговыделений:
а – в середине активной зоны; б – в верхней части активной зоны

Из рисунков 2, 5-7 видно, что полученные значения исследуемых величин не превышают предельных общепринятых (проектных) значений, которые составляют:

- для давления в первом контуре – не должно превышать 115 % от расчетного значения, т. е. 20,29 МПа (полученный максимум 18,34

МПа);

- для температуры оболочек ТВЭЛ – не более 1200 °С;
- для температуры топлива – не более 2540 °С для выгоревшего топлива и 2840 °С для свежего топлива;
- для энтальпии топлива – не более 840 Дж/г для выгоревшего топлива и 963 Дж/г для свежего топлива.

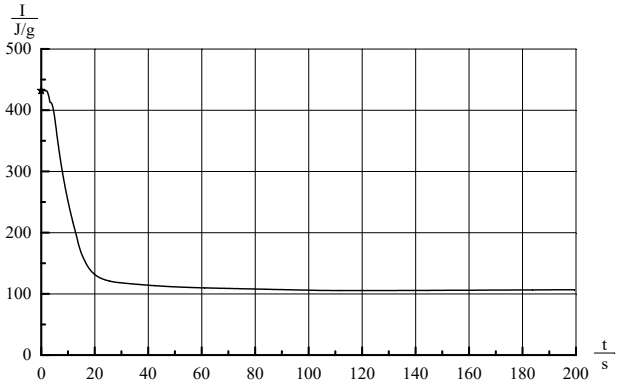


Рис. 7. Максимальная радиально-усредненная энтальпия топлива

Таким образом, при возникновении аварийной ситуации, обусловленной мгновенным прекращением расхода теплоносителя в одной из петель первого контура, с учетом принятых консервативных условий протекания аварии, а также, несмотря на кратковременное возникновение кризиса теплоотдачи для наиболее энергонапряженных ТВЭЛ, перегрева топлива и оболочек ТВЭЛ не произойдет. Поэтому топливные оболочки повреждены не будут, и водород в первом контуре не выделится.

Следовательно, основные критерии безопасности ЯЭУ выполняются, и принятые защитные автоматические действия систем безопасности обеспечат перевод реакторной установки в безопасное состояние.

Заключение

Проведенные исследования по оценке возможности обеспечения охлаждения активной зоны ВВЭР-1000 при резком снижении расхода теплоносителя через реактор показали следующие результаты:

- с учетом принятых консервативных начальных условий аварии (обесточивание энергоблока, отказ отдельных защитных механизмов), основные параметры, характеризующие теплогидравлическую надежность активной зоны: давление в первом контуре, энтальпия, топлива, температура оболочек ТВЭЛ, температура топлива, не достигли проектных предельных значений;
- защитные действия систем безопасности обеспечили перевод реакторной установки в безопасное состояние, что свидетельствует об эффективности принятых мер по управлению данной аварией.

Список литературы

1. Иванов В.А. Эксплуатация АЭС: Учебник для вузов / В.А. Иванов. – СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отд-ние. 1994. – 384 с., ил.
2. Зорин В.М. Атомные электростанции: учебное пособие / В.М. Зорин. – М.: издательский дом МЭИ, 2012. – 673 с.: ил.
3. Выговский С.Б. Безопасность и задачи инженерной поддержки эксплуатации ядерных энергетических установок с ВВЭР / С.Б. Выговский, Н.О. Рябов, Е.В. Чернов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2013. – 304 с.

References

1. Ivanov V.A. *Ekspluatatsiya AES: Uchebnik dlya vuzov* [Operation of NPP: Textbook for high schools]. Saint-Petersburg, Energoatomizdat Publ., 1994, 384 p.
2. Zorin V.M. *Atomnye electrostantsii: uchebnoe posobie* [Nuclear power plants: textbook]. Moscow, MEI Publ, 2012, 673 p.
3. Vygovskiy S.B., Ryabov H.O., Chernov E.V. *Bezopasnost i zadachi inzhenernoy podderzhki ekspluatatsii yadernykh energeticheskikh ustanovok s VVER* [Safety and issues of the WWER nuclear installation operation engineer assistance]. Moscow, NIYAU MEPFI Publ., 2013, 304 p.

УДК 621.039.56

Локализация теплогидравлических аномалий в активной зоне реакторов некипящего типа на основе корреляционного анализа акустических шумов

С.А. Качур, Е.Н. Давиденко, К.А. Манжула, И.И. Азаров
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 11.02.2020 г.; после доработки 13.02.2020 г.

Аннотация

Предложен метод оперативной локализации теплогидравлических аномалий по показаниям акустических гидрофонов, установленных в камере смешения на выходе каналов активной зоны ядерного реактора.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, теплогидравлическая аномалия, корреляционный анализ.

Localization of thermohydraulic anomalies in the core of non-boiling type reactors based on correlation analysis of acoustic noise

S.A. Kachur, E.N. Davidenko, K.A. Manzhula, I.I. Azarov
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 11.02.2020 y.; received in final form 13.02.2020 y.

Abstract

The method of operative localization of thermal-hydraulic anomalies based on the indications of acoustic hydrophones installed in the mixing chamber at the outlet of the channels of the core of a nuclear reactor is proposed

Keywords: nuclear reactor, active zone, thermal-hydraulic anomaly, correlation analysis.

Введение

В процессе работы ядерной установки наблюдаются старение, износ и усталостные разрушения элементов активной зоны и оборудования, которые приводят к снижению эксплуатационной надежности и уменьшению запасов прочности, в связи с этим могут появиться отказы, обусловленные разрушениями напряженных элементов.

Кроме того, при пуске реактора не исключены различные отклонения от проектных и конструкционных параметров, что может привести также к нарушению целостности контура [1-6].

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

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

Анализ эффективных подходов к решению задачи безопасности ЯР на основе верификации экспериментальных корреляций для расчета КТП в ТВС водоохлаждаемых ЯР с использованием версий теплодинамических кодов RELAP-5/ MOD 3 позволил определить следующий важный следующий аспект этой проблемы.

Разработка методологии локальной верифи-

кации 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. 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.

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 в структуре технических средств поддержки оператора (СПО) АЭС нового поколения.

В статье предлагается итерационный метод анализа парных корреляций акустических шумов, вызванных изменениями процесса теплообмена.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка метода локализации теплогидравлических аномалий для некипящих реакторов на основе корреляционного анализа акустических шумов для прогнозирования возможности кризиса теплообмена.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1) провести анализ методик диагностики внутриреакторных аномалий на основе исследования акустических шумов;
2) исследовать возможности применения корреляционного анализ для локализации внутриреакторных аномалий;
3) разработать метод локализации теплогидравлических аномалий по информации от датчиков, уставленных в камере смешения.

1. Анализ методик диагностики внутриреакторных аномалий на основе исследования акустических шумов

Одним из наиболее эффективных способов обнаружения внутриреакторных аномалий является контроль и анализ шумов физических и технологических параметров в процессе эксплуатации [3].

Типовая методика «шумового» контроля и диагностики оборудования установки содержит следующие основные этапы:

1) составление эталонных спектров «шумовых» сигналов при различных режимах работы контура;
2) оперативный «шумовой» контроль и сравнения получаемых результатов с эталонными данными;
3) анализ «шумовых» сигналов и выявление их изменений;
4) сопоставление результатов анализа со структурой оборудования в целях выработки диагноза;
5) принятие решения о возможности эксплуатации оборудования.

Интерес к возможности регистрации шумов в практике эксплуатации энергетических реакторов возник в результате анализа многочисленных аварий, вызванных нарушением механической целостности контура теплоносителя.

Возможные неисправности внутриреакторного характера, диагноз которых можно осуществлять с помощью «шумового» анализа:

1) усталостные повреждения и растрескивания металла корпуса, внутриреакторных конструкций или трубопроводов;
2) ослабление болтов или других соединительных деталей;
3) нарушение заданного режима работы органов регулирования;
4) образование пробок в контурах теплоносителя вследствие скопления посторонних предметов;
5) чрезмерные вибрации внутриреакторных конструкций;
6) нестабильность или другие отклонения от нормального режима в потоке теплоносителя.

Разнообразие технологических нарушений в активной зоне проявляется в определенном частотном диапазоне флуктуаций рассматриваемого параметра прямым или косвенным образом.

В таблице приведены характерные частотные диапазоны, в пределах которых проявляются нейтронно-теплофизические процессы, определяющие динамику активной зоны реактора.

Одним из параметров наиболее чувствительных к различным аномалиям в активной

зоне, является реактивность, которая проявляется через изменение потока нейтронов. Причины, вызывающие флуктуации реактивности и, следовательно, флуктуации показаний детекторов, весьма разнообразны. Это может быть изменение геометрии топлива и поглощающих материалов, плотности теплоносителя и замедлителя и т.д. Анализ флуктуаций нейтронного потока позволил выяснить и устранить пространственные колебания активной зоны и ее элементов.

Таблица. *Частотный диапазон действия наиболее характерных нейтронно-теплофизических процессов, протекающих в активной зоне*

Приблизительный частотный диапазон, Гц	Примеры динамических процессов
10^{-3}-10^{-5}	Ксеноновое отравление; охлаждение корпуса
10^{-2}-10^{-3}	Охлаждение внутрикорпусных устройств
10^{-1}-10^{-2}	Автоматическое регулирование процессов
10-10^{-1}	Прохождение теплоносителя и процессы теплообмена
10-10^{2}	Вибрация внутрикорпусных конструкций
10^{2}-10^{4}	Время жизни нейтронов в реакторах на тепловых нейтронах; акустические шумы металлических конструкций
10^{4}	Время жизни нейтронов в реакторах на быстрых нейтронах; излучение волн напряжений

В работе [5] рассмотрено экспериментальное исследование, выполненное И.А. Поповым, поверхностного кипения в исследовательском канале. Исследование выполнено в кольцевом канале, вмонтированном в центральный экспериментальный канал исследовательского ядерного реактора ИР-100. Детектирование кипения в канале осуществляется акустическими гидрофонами и датчиками нейтронного потока, расположенными по высоте канала l=0,5м вверху и внизу.

Из рассмотрения акустических спектров кипения были сделаны следующие выводы.

1. Частотные характеристики 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.

2. Исследование возможностей применения корреляционного анализ для локализации внутриреакторных аномалий

При рассмотрении зависимости между признаками выделяют две категории зависимости:

- функциональные зависимости;
- корреляционные зависимости.

Корреляционные связи между изменением факторного и результативного признака характеризуются отсутствием полного соответствия, т.е. воздействие отдельных факторов проявляется лишь в среднем при массовом наблюдении фактических данных.

Одновременное воздействие на изучаемый признак большого количества разнообразных факторов приводит к тому, что одному и тому же значению признака–фактора соответствует целое распределение значений результативного признака. При корреляционной зависимости связь между признаками проявляется лишь в среднем, каждому значению аргумента соответствуют случайно распределенные в некотором интервале значения функции.

Этапы корреляционного анализа:

- предварительный анализ свойств моделируемой совокупности единиц;
- установление факта наличия связи, определение ее направления и формы;
- изменение степени тесноты связи между признаками;
- построение регрессионной модели, т.е. нахождение аналитического выражения связи;
- оценка адекватности модели.

Условия применения методов корреляционного анализа:

- требование однородности исследуемых единиц; количественная оценка однородности исследуемой совокупности по комплексу признаков – коэффициент вариации;
- требование достаточного числа наблюдений; «взаимопогашение» влияния случайных факторов на результативный показатель в известной мере происходит при выведении средней результативного показателя

для массы случаев;

- требование к факторам при ограничении их число: а) рассмотрение значимых факторов, оказывающих наибольшее влияние на величину результативного показателя; б) независимость факторов друг от друга, так как наличие тесной связи между ними свидетельствует о том, что они дублируют друг друга;
- требование к форме распределения факторов, поскольку все основные положения теории корреляции разрабатывались применительно к предположению о нормальном характере распределения исследуемых признаков;
- факторы должны иметь количественное выражение.

Варианты корреляционных зависимостей:

- парная корреляция – связь между двумя признаками (результативным и факторным или двумя факторными);
- частная корреляция – зависимость между результативным и одним факторным признаками при фиксированном значении других факторных признаков;
- множественная корреляция – зависимость результативного и двух или более факторных признаков, включенных в исследование.

Первоначально необходимо определить: насколько правомерно заключение по выборочным данным в отношении действительного наличия корреляционной связи в той генеральной совокупности, из которой была произведена выборка.

При этом принимается следующее допущение. Рассматриваемые критерии существенности предполагают, что в генеральной совокупности значение признака описывается нормальным распределением.

Значимость линейного коэффициента корреляции проверяется на основе t-критерия Стьюдента. Выдвигается и проверяется гипотеза о равенстве коэффициента корреляции нулю

$H_0 : r = 0$.

Для n<50 при проверке гипотезы используется t-статистика:

$$t_p = \frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}}\sqrt{n-2}$$

.

Для n>100 при проверке гипотезы используется t-статистика:

$$t_p = \frac{|r|}{\sqrt{1-r^2}}\sqrt{n}$$

.

При выполнении H0 t-статистика имеет распределение Стьюдента с входными параметрами t(α, k), где α – уровень значимости, k – число степеней свободы.

Если расчетное значение tp, > tkp (табличное), то гипотеза H0 отвергается, что свидетельствует о значимости линейного коэффициента корреляции, а, следовательно, и о статистической существенности корреляции x и Y.

Для количественной оценки тесноты связи широко используется линейный коэффициент корреляции

$$r = \frac{\sum (x-\bar{x})(Y-\bar{Y})}{\sqrt{\sum (x-\bar{x})^2 \sum (Y-\bar{Y})^2}}.$$

3. Метод локализации теплогидравлических аномалий по информации от датчиков, уставленных в камере смешения

Задача описания зависимости энергораспределения от энерговыделения конкретных каналов активной зоны через парные коэффициенты корреляции амплитуды шумов, порождаемых теплогидравлическими аномалиями, алгоритмически достаточно проста.

Для применения корреляционного анализа имеется достаточный объем статистической информации, получаемой, например, от акустических гидрофонов, установленных над выходами каналов и аккумулирующих в конкретной точке информацию о распространении звука в камере смешения.

Чтобы уменьшить размерность задачи (размерность корреляционной матрицы, элементами которой являются парные коэффициенты корреляции), определяемой размером активной зоны, а именно задаваемой величиной $n \times n$ (n – количество каналов), необходимо использовать итеративный алгоритм пошагового сужения поиска канала с теплогидравлической аномалией.

Предлагаемый метод состоит из следующих этапов.

Построение корреляционной матрицы амплитуд шумов по показаниям основных датчиков (гидрофонов)

$R = \|r_{ij}\|$, $i = \overline{1,n}$, $j = \overline{1,n}$.

Определение номера канала I0, для которого коэффициенты парной корреляции имеют наибольшие значения

$$I_0 = \arg\left(\max_i \sum_j r_{ij} \right).$$

Рассмотрение множества M мощностью m ближайших к каналу I0 вспомогательных датчиков.

Построение корреляционной матрицы для канала I0 и каналов с выбранными вспомогательными датчиками.

$$R' = \left\| r'_{ls} \right\|,\ l = \overline{1, m+1},\ s = \overline{1, m+1}.$$

1. Определение номера канала L_0

$$L_0 = \arg\left(\max_l \sum_s r'_{ij} \right).$$

2. Заключение о возможности теплогидравлической аномалии в канале L_0.

Количество шагов детализации поиска может быть увеличено.

Например, на первом этапе поиска рассматривается 50 датчиков равномерно распределенных по камере смешения в радиальном направлении; на втором – 10 дополнительных датчиков, равномерно распределенных вокруг каждого основного датчика; на третьем этапе для каждого дополнительного датчика имеется еще по 4 датчика, равноотстоящих от него. В этом случае активная зона может содержать не менее 2000 каналов, имеющих на выходе акустические гидрофоны. Размерность задачи определяется тремя корреляционными матрицами: 50×50, 10×10, 4×4. При отсутствии поэтапного анализа размерность задачи определялась бы корреляционной матрицей 2000×2000.

Предложенный метод прост и оперативен для оперативного выявления возможных теплогидравлических аномалий.

Заключение

Предложен метод оперативной локализации теплогидравлических аномалий по показаниям акустических гидрофонов, установленных в камере смешения на выходе каналов активной зоны ядерного реактора типа ВВЭР.

В отличии от «шумовой» методики в разработанном методе отсутствуют эталонные данные, не рассматривается спектр сигналов, а анализируется только суммарная амплитуда сигналов спектра в различных точках камеры смешения.

Разработанный метод обработки и получения данных о состоянии активной зоны позволяет повысить быстродействие, что способствует предупреждению кризиса теплообмена.

Результаты исследование могут быть использованы для модификации СВРК ЯЭУ.

Список литературы

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

References

1. Eremenko V.A. *Puti obespecheniya bezopasnogo upravleniya atomnymi energeticheskimi ustanovkami* [Ways of providing of safe management by the atomic power plants]. Kiev, Techika, 1988. 256p.
2. Emel'yanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Naucho-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami* [Scientific and technical government bases by nuclear reactors]. Moskow, Energoizdat, 1981. 360p.
3. Emel'yanov I.Ya., Gavrilov P.A., Seliverstov B.N. *Upravlenie i bezopasnost' yadernyh energeticheskih reaktorov* [Control and safety of nuclear power reactors]. Moskow, Atomizdat, 1975. 280p.
4. Kirilov P.L., Yur'ev Yu.L., Bobkov V.P. *Spravochik po teplogidravlicheskim raschyotam* [Reference book upon heat-hydraulic accounts]. Moskow, Energoizdat, 1990, 360p.
5. Popov I.A., Kachur S.A. Identification of process of the superficial boiling of coolant in the active zone APP with PWR. *Sevastopol: Sb.nauch.tr. SNUYaEiP*, 2009, No 4(32), pp. 68-76.
6. Kachur S.A. *Research of dirigibility of nuclear reactor on the basis of analysis of the Bessel function. Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sevastopol, SNUYaE i P, 2013, No. 2(46), pp. 36-45.

УДК 621.039

Термоупругость охлаждаемых рабочих лопаток с полками газотурбинных установок

В.А. Пухлий, К.В. Пухлий

ФГАОУ ВО Севастопольский государственный университет, Университетская, 33, г.Севастополь, 299053, Россия, pu1611@rambler.ru

Статья поступила 07.02.2020 г.; после доработки 10.02.2020 г.

Аннотация

Предложена математическая модель и алгоритм решения задачи термоупругости для рабочих лопаток газовых турбин с полками и с воздушным охлаждением. При расчете НДС лопатка схематизируется как трехслойная конструктивно-ортотропная оболочка переменной жесткости, при этом поперечный набор ребер охлаждаемых каналов рассматривается как жесткий несжимаемый в поперечном направлении заполнитель. Рассматривается случай, когда физико-механические характеристики материала зависят от температуры. Решение задачи основано на применении метода интегральных соотношений Дородницына и модифицированного метода последовательных приближений, разработанного проф.В.А.Пухлий.

Ключевые слова: газотурбинные установки, рабочие лопатки с полками, трехслойная ортотропная оболочка, жесткий заполнитель, модифицированный метод последовательных приближений.

Thermoelasticity of cooled blades with shelves of gas turbine installations

V.A. Pukhliy, K.V. Pukhliy

FSAEI of HE Sevastopol State University, Universitetskaya, 33, Sevastopol, 299053, Russia, pu1611@rambler.ru

Received 07.02.2020 y.; received in final form 10.02.2020 y.

Abstract

A mathematical model and algorithm for solving the problem of thermoelasticity for working blades of gas-turbines with shelves and with air cooling are proposed. When calculating the VAT, the blade is schematized as a three-layer structural-orthotropic shell of variable stiffness, while the transverse set of ribs of the cooled channels is considered as a rigid, incompressible in the transverse direction, aggregate. The case is considered when the physicomechanical characteristics of the material depend on temperature. The solution to the problem is based on the application of the method of integral relations Dorodnitsyn and the modified method of successive approximations developed by Prof. V.A. Pukhliy.

Keywords: gas turbine units, rotor blades with shelves, three-layer orthotropic shell, rigid aggregate, modified method of successive approximations

Введение

В предыдущей работе авторов [1] были рассмотрены вопросы термоупругости рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок консольного типа на основе теории трехслойных конструктивно-ортотропных оболочек. Был изложен современный взгляд на классификацию задач термоупругости на основе теории, разработанной А.Д.Коваленко [2]. В работе авторов [1] рассматривается термоупругость рабочих лопаток консольного типа. При решении задач данного типа консольный вариант не позволяет с достаточной точностью выбрать аппроксимирующие функции, удовлетворяющие граничным условиям на свободном крае лопатки. В резуль-

тате при построении алгоритма расчета в вариационном функционале для лопатки появляются внеинтегральные члены, что существенным образом затрудняет решение задачи.

В настоящей работе рассматривается несвязанная задача термоупругости [2]. Исследуется довольно часто применяемый в теории газотурбинных установок, вариант рабочих лопаток с полками (рис.1), позволяющий построить эффективную систему аппроксимирующих функций, что позволяет точно удовлетворить геометрическим граничным условиям на краях лопатки [3]. При этом в вариационном функционале для лопатки пропадают внеинтегральные члены.

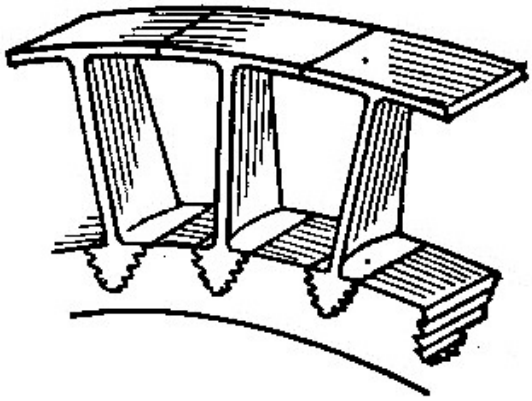


Рис. 1. Рабочие лопатки с полками газотурбинных установок [3].

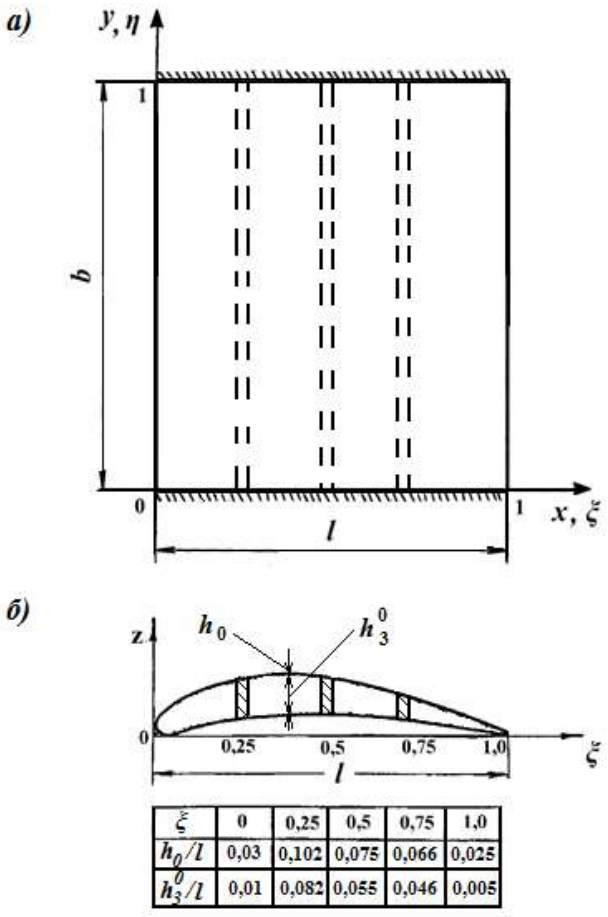
Следует отметить, что главным достоинством лопаток с полками является их высокая вибропрочность. На внешней поверхности полки выполняют гребни лабиринтного уплотнения, уменьшающего перетекание газа и повышающего к.п.д. газовой турбины. Лопатки крепятся к дискам замками различных типов.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является разработка метода решения несвязанной статической задачи термоупругости рабочих лопаток с полками газотурбинных установок и воздушным охлаждением на основе теории конструктивно-ортотропных оболочек переменной жесткости с учетом зависимости физико-механических характеристик материала лопаток от температуры.

Внешняя и внутренняя геометрия лопатки

Конструктивные исполнения рабочих лопаток с полками представлены на рис.1. На рис.2 приводится геометрия и система координат рабочих лопаток с полками. Система охлаждения рабочих лопаток показана в работах [1, 3].



ξ	0	0,25	0,5	0,75	1,0
h_0/l	0,03	0,102	0,075	0,066	0,025
h_3^0/l	0,01	0,082	0,055	0,046	0,005

Рис.2. К расчету лопатки с полками газотурбинной установки: а) геометрия и система координат; б) профиль лопатки.

С точки зрения механики конструкционных элементов такую лопатку можно рассматривать как трехслойную конструктивно-ортотропную оболочку переменной жесткости.

Поперечные ребра каналов охлаждения выполняют роль ортотропного заполнителя. Приведенные упругие параметры такого заполнителя определяются по методике, изложенной в [4].

Функции изменения толщины лопатки и толщины заполнителя записываются в виде:

$$h(\xi,\eta) = h_0\lambda_1 t_1(\xi)t_2(\eta)$$

$$h_3(\xi,\eta) = h_3^0\lambda_2 r_1(\xi)r_2(\eta) \qquad (1)$$

Здесь h_0 и h_3^0 – максимальные толщина лопатки и толщина заполнителя, заданные в корневом сечении; $\lambda_1 = l/h_0$, $\lambda_2 = l/h_3^0$ – геометрические параметры лопатки; $\xi = x/l$, $\eta = y/b$ – безразмерные координаты.

Безразмерные функции $t_1(\xi)$, $r_1(\xi)$ и $t_2(\eta)$, $r_2(\eta)$, характеризующие относительное изменение толщины лопатки и заполнителя по ее длине и по хорде, соответственно задают в виде:

$$t_2 = [1 + (\psi_1 - 1)\eta];$$
$$r_2(\eta) = [1 + (\psi_2 - 1)\eta];$$
$$t_1 = \left[b_{1i} + b_{2i}(\xi - \xi_{i-1}) + b_{3i}(\xi - \xi_{i-1})^2 + \right.$$
$$\left. + b_{4i}(\xi - \xi_{i-1})^3\right];$$
$$r_1 = \left[c_{1i} + c_{2i}(\xi - \xi_{i-1}) + c_{3i}(\xi - \xi_{i-1})^2 + \right.$$
$$\left. + c_{4i}(\xi - \xi_{i-1})^3\right]. \qquad (2)$$

Здесь $\psi_1 = h_n / h_0$ – отношение толщины лопатки в периферийном сечении к толщине лопатки в корневом сечении соответственно. Выражения для $t_1(\xi)$ и $r_1(\xi)$, представляющие собой коэффициенты сплайн-многочленов на каждом интервале определяются из условий в узлах.

Уравнения срединной поверхности лопатки запишутся следующим образом:

$$f(\xi, \eta) = f_0 \lambda_3 f_1(\xi) f_2(\eta);$$
$$f_1(\xi) = [a_{1i} + a_{2i}(\xi - \xi_{i-1}) + a_{3i}(\xi - \xi_{i-1})^2 +$$
$$+ a_{4i}(\xi - \xi_{i-1})^3];$$
$$f_2(\eta) = [1 + (k-1)\eta], \qquad (3)$$

где f_0 – максимальная стрела изогнутости в корневом сечении; k – отношение стрелы изогнутости в периферийном сечении к f_0;

$\lambda_3 = l / f_0$ – геометрический параметр лопатки. Здесь, как и ранее, безразмерные функции f_1 и f_2 характеризуют относительное изменение стрелы изогнутости лопатки по хорде и по ее длине соответственно. Величины a_{ni} (i = 1, 2, 3, 4) являются коэффициентами сплайн-много-членов и определяются на каждом интервале из условий в узлах.

Закон закрутки лопатки по ее длине $\varphi = \varphi(\eta)$ может быть произвольным. В ряде случаев можно принять $\varphi = \lambda^{-1}\eta$, где $1/\lambda$ – параметр закрутки, равный φ_0 / b (закрутка на единицу длины). Переходим к рассмотрению геометрических параметров поверхности лопатки. Примем неподвижную систему координат xyz, при этом плоскость $x0z$ совпадает с плоскостью корневого сечения, ось x – с направлением хорды, ось y перпендикулярна плоскости корневого сечения. Кроме этого, рассмотрим подвижную систему координат $\xi\eta\beta$, у которой ось ξ совпадает с осью x, ось η – с направлением подвижной хорды, ось β перпендикулярна оси η. Вполне очевидно, что система координат $\eta 0 \beta$ в каждом сечении лопатки повернута относительно системы $y0z$ на угол $\varphi(y) = \lambda^{-1} y$.

Выразим в векторной форме уравнение срединной поверхности рассматриваемой лопатки. Записывая компоненты радиуса-вектора в виде

$$x = \eta\cos\varphi - \beta\sin\varphi,$$
$$y = \lambda\varphi = \xi,$$
$$z = \eta\, sin\varphi + \beta\, cos\varphi,$$

получим формулу для радиус-вектора срединной поверхности лопатки

$$\vec{R} = \vec{R}(\eta, \beta) = (\eta\cos\varphi - \beta\sin\varphi)\vec{i} + \lambda\varphi\vec{j} +$$
$$+ (\eta\, sin\varphi + \beta\, cos\varphi)\vec{k},$$

где $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – единичные векторы, а ось β совпадает с направлением f (3).

Перейдем к геометрическим параметрам поверхности лопатки. Как показывает анализ геометрических параметров лопаток газовых турбин и комбинированных установок, лопатки таких турбомашин представляют собой тонкие пологие оболочки, у которых система координатных осей является не главной, но ортогональной.

Дифференцируя радиус-вектор $\vec{R}(\eta, \beta)$ по β и η, с учетом предположения о пологости лопатки получим формулы для выражения параметров Ламе:

$$A_1 = \sqrt{1 + f_{,2}^2}; \qquad A_2 = 1; \qquad A_{12} = 0 \quad (4)$$

и выражения для кривизн:

$$k_{11} = A_2^{-3} f_{,11}; \qquad k_{22} = 0;$$
$$k_{12} = \left(\lambda^{-1} + A_2^{-2} f_{,12}\right). \qquad (5)$$

Здесь и в дальнейшем нижний индекс i, следующий после запятой, означает частное дифференцирование по координате x_i, при этом $i = 1$ соответствует дифференцированию по ξ, а $i = 2$ по η.

Уравнения термоупругости трехслойных конструктивно-ортотропных оболочек

Рассмотрим уравнения термоупругости и граничные условия для рабочей лопатки с полками. При построении теории приняты следующие гипотезы [5]: а) несущие слои выполнены из

разных ортотропных материалов; б) заполнитель и несущие слои жестко соединены по всей поверхности соприкосновения; в) к несущим слоям применима гипотеза Кирхгофа-Лява о прямой нормали; г) заполнитель несжимаем в поперечном направлении и ортотропен; д) оси ортотропии несущих слоев и заполнителя параллельны; е) деформации поперечного сдвига по толщине заполнителя распределены по некоторому известному закону.

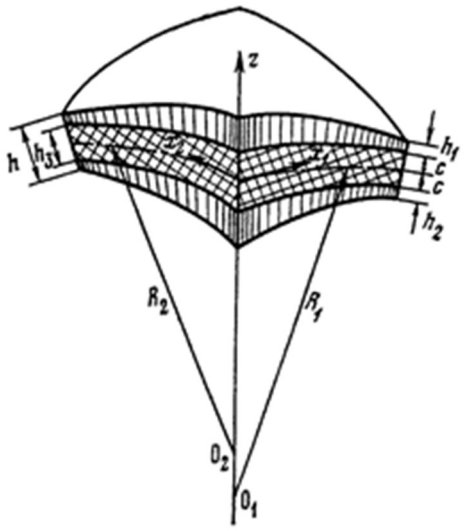


Рис.3. Элемент трехслойной оболочки переменной толщины.

На рис.3 показан элемент трехслойной лопатки переменной толщины.

Положительную нормальную координату z будем отсчитывать в сторону внешней нормали к исходной поверхности лопатки. Называя несущий слой, расположенный со стороны внешней нормали, первым, со стороны внутренней нормали – вторым, а заполнитель – третьим, введем следующие обозначения (рис.3): $\mathrm{h} = \mathrm{h}(\mathrm{x}_1, x_2)$ – толщина оболочки; $h_k = h_k(x_1, x_2)$ – толщина слоев (k = 1, 2, 3).

Считая для несущих слоев и заполнителя справедливой гипотезу прямой нормали, получим, что перемещения в поверхности, эквидистантной срединной, имеют вид

– в верхнем несущем слое $\left(\frac{c}{2} \le z \le \frac{c}{2} + h_1\right)$:

$$u = u_1 + \left(z - \frac{c + h_1}{2}\right) w_{,1};$$

$$\mathrm{v} = \mathrm{v}_1 + \left(z - \frac{c + h_1}{2}\right) w_{,2}; \qquad (6)$$

– в заполнителе $\left(-\frac{c}{2} \le z \le \frac{c}{2}\right)$:

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2} - \frac{h_1 - h_2}{4} w_{,1} + \frac{z}{c}\left(u_1 - u_2 - \frac{h_1 + h_2}{2} w_{,1}\right);$$

$$\mathrm{v} = \frac{\mathrm{v}_1 + \mathrm{v}_2}{2} - \frac{h_1 - h_2}{4} w_{,2} + \frac{z}{c}\left(\mathrm{v}_1 - \mathrm{v}_2 - \frac{h_1 + h_2}{2} w_{,2}\right); \qquad (7)$$

– в нижнем слое $\left(-\frac{c}{2} - h_2 \le z \le -\frac{c}{2}\right)$:

$$u = u_2 + \left(z + \frac{c + h_2}{2}\right) w_{,1};$$

$$\mathrm{v} = \mathrm{v}_2 + \left(z + \frac{c + h_2}{2}\right) w_{,2}. \qquad (8)$$

Здесь u и v – соответствующие переменной вдоль осей x_i ($\mathrm{i} = 1, 2$) точки поверхности, отстоящей на z от срединной; c – толщина заполнителя; h_1 и h_2 – соответственно толщина верхнего и нижнего слоев; u_1, v_1 и u_2, v_2 – перемещения точек срединной поверхности верхнего и нижнего несущих слоев вдоль осей x_1, x_2.

Напряженное состояние в несущих слоях и заполнителе считается плоским. Согласно закону Гука напряжения равны

– в несущих слоях:

$$\sigma_1 = \frac{E_1}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}\left[\varepsilon_1 + \mu_{21}\varepsilon_2 - (\alpha_1 + \mu_{21}\alpha_2)T\right];$$

$$\sigma_2 = \frac{E_2}{1 - \nu_{12}\nu_{21}}\left[\varepsilon_2 + \mu_{12}\varepsilon_1 - (\alpha_2 + \mu_{12}\alpha_1)T\right];$$

$$\tau_{12} = G_{12}\gamma_{12}; \qquad (9)$$

– в заполнителе:

$$\sigma_1 = \frac{E_1^*}{1 - \nu_{12}^*\nu_{21}^*}\left[\varepsilon_1 + \mu_{21}^*\varepsilon_2 - (\alpha_1^* + \mu_{21}^*\alpha_2^*)T\right];$$

$$\sigma_2 = \frac{E_2^*}{1 - \nu_{12}^*\nu_{21}^*}\left[\varepsilon_2 + \mu_{12}^*\varepsilon_1 - (\alpha_2^* + \mu_{12}^*\alpha_1^*)T\right];$$

$$\tau_{12} = G_{12}^*\gamma_{12}; \quad \tau_{1z} = G_{13}^*\gamma_{1z}; \quad \tau_{2z} = G_{23}^*\gamma_{2z}. \qquad (10)$$

Здесь предполагается, что главные оси упругой и термической ортотропии совпадают. При этом E_1 и E_2 – модули упругости первого рода несущих слоев; μ_{12} и μ_{21} – коэффициенты Пуассона несущих слоев, α_1 и α_2 – коэффициенты линейного температурного расширения; T = T(x, y,

z) – температура. Величины E_1^*, E_2^*, G_{12}^*, G_{23}^*, μ_{12}^*, μ_{21}^* относятся к заполнителю.

Кроме того, имеем:

$$E_1\mu_{21} = E_2\mu_{12}; \quad E_1^*\mu_{21}^* = E_2^*\mu_{12}^*. \qquad (11)$$

Осевые относительные деформации ε_1, ε_2 и углы сдвига γ_{12}, γ_{1z}, γ_{2z} будут:

$$\varepsilon_1 = u_{,1} - \frac{w}{R_1} + \frac{1}{2}w_{,1}^2;\ \varepsilon_2 = u_2 - \frac{w}{R_2} - \frac{1}{2}w_{,2}^2;$$
$$\gamma_{12} = \mathrm{v}_{,1} + u_{,2} + w_{,1}w_{,2}; \quad \gamma_{1z} = u_{,z} - w_{,1};$$
$$\gamma_{2z} = \mathrm{v}_{,z} - w_{,2}. \qquad (12)$$

Согласно гипотезе $\varepsilon_z = 0$, так как оболочка по толщине несжимаема.

Введем удельные усилия и моменты:

$$N_{11} = N_{11}^1 + N_{11}^2 + N_{11}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\sigma_1 dz + \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\sigma_1 dz + \int_{-c/2}^{c/2}\sigma_1 dz;$$
$$N_{22} = N_{22}^1 + N_{22}^2 + N_{22}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\sigma_2 dz + \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\sigma_2 dz + \int_{-c/2}^{c/2}\sigma_2 dz;$$
$$N_{12} = N_{12}^1 + N_{12}^2 + N_{12}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\tau_{12} dz + \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\tau_{12} dz + \int_{-c/2}^{c/2}\tau_{12} dz;$$
$$M_{11} = M_{11}^1 + M_{11}^2 + M_{11}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\sigma_1 z dz - \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\sigma_1 z dz - \int_{-c/2}^{c/2}\sigma_1 z dz; \qquad (13)$$
$$M_{22} = M_{22}^1 + M_{22}^2 + M_{22}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\sigma_2 z dz - \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\sigma_2 z dz - \int_{-c/2}^{c/2}\sigma_2 z dz;$$
$$M_{12} = M_{12}^1 + M_{12}^2 + M_{12}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\tau_{12} z dz + \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\tau_{12} z dz + \int_{-c/2}^{c/2}\tau_{12} z dz.$$

Здесь верхние индексы относятся к соответствующим слоям лопатки.

Введем обозначения:

$$u_\alpha = \frac{u_1 + u_2}{2}; \qquad \mathrm{v}_\alpha = \frac{\mathrm{v}_1 + \mathrm{v}_2}{2};$$
$$u_\beta = \frac{u_1 - u_2}{2}; \qquad \mathrm{v}_\beta = \frac{\mathrm{v}_1 - \mathrm{v}_2}{2};$$
$$h = 2h_3 + h_1 + h_2. \qquad (14)$$

Подставляя в формулы (13) выражения для напряжений (9)-(10) с учетом (6)-(8) и (12), получим выражения для удельных усилий N_{11}, N_{22}, N_{12} и удельных изгибающих и крутящих моментов - M_{11}, M_{22}, M_{12}:

$$N_{11} = B_{11}\left[u_{1,1} + \mu_{21}\mathrm{v}_{1,2} + \frac{1}{2}(w_{,1}^2 + \mu_{21}w_{,2}^2) - w\left(\frac{1}{R_1} + \mu_{21}\frac{1}{R_2}\right)\right] +$$
$$+ B_{12}\left[u_{2,1} + \mu_{21}\mathrm{v}_{2,2} + \frac{1}{2}(w_{,1}^2 + \mu_{21}w_{,2}^2) - w\left(\frac{1}{R_1} + \mu_{21}\frac{1}{R_2}\right)\right] +$$
$$+ B_1^*\left[\frac{u_{1,1} + u_{2,1}}{2} + \mu_{21}^*\frac{\mathrm{v}_{1,2} - \mathrm{v}_{2,2}}{2} - \frac{h_1 - h_2}{4}(w_{,11} + \mu_{21}^* w_{,22}) -\right.$$
$$- \frac{h_{1,1} - h_{2,1}}{4}w_{,1} - \mu_{21}^*\frac{h_{1,2} - h_{2,2}}{4}w_{,2} + \frac{1}{2}(w_{,1}^2 + \mu_{21}^* w_{,2}^2) -$$
$$\left. - w\left(\frac{1}{R_1} + \mu_{21}^*\frac{1}{R_2}\right)\right] - f_1; \qquad (15)$$

$$N_{22} = B_{21}\left[\mathrm{v}_{1,2} + \mu_{12}u_{1,1} + \frac{1}{2}(w_{,2}^2 + \mu_{12}w_{,1}^2) - w\left(\frac{1}{R_2} + \mu_{12}\frac{1}{R_1}\right)\right] +$$
$$+ B_{22}\left[\mathrm{v}_{2,2} + \mu_{12}u_{2,1} + \frac{1}{2}(w_{,2}^2 + \mu_{12}w_{,1}^2) - w\left(\frac{1}{R_2} + \mu_{12}\frac{1}{R_1}\right)\right] +$$
$$+ B_2^*\left[\frac{\mathrm{v}_{1,2} + \mathrm{v}_{2,2}}{2} + \nu_{12}^*\frac{u_{1,1} + u_{2,1}}{2} - \frac{h_1 - h_2}{4}(w_{,22} + \mu_{12}^* w_{,11}) -\right.$$
$$\left. - w\left(\frac{1}{R_2} + \mu_{12}^*\frac{1}{R_1}\right)\right] - f_2; \qquad (16)$$

$$N_{12} = B_{31}(\mathrm{v}_{1,1} + u_{1,2} + w_{,1}w_{,2}) +$$
$$+ B_{32}(\mathrm{v}_{2,1} + u_{2,2} + w_{,1}w_{,2}) +$$
$$+ \mathrm{B}_3^*\left(\frac{u_{1,2} + u_{2,2}}{2} + \frac{v_{1,1} + v_{2,1}}{2} - \frac{h_1 - h_2}{2}w_{,12} +\right.$$
$$\left. + w_{,1}w_{,2} - \frac{\mathrm{h}_{1,2} - h_{2,2}}{4}w_{,1} - \frac{h_{1,1} - h_{2,1}}{4}w_{,2}\right); \qquad (17)$$

$$M_{11} = -B_{11}\frac{h_1 + h_3}{2}\left[u_{1,1} + \mu_{21}\mathrm{v}_{1,2} + \frac{1}{2}\left(w_{,1}^2 + \mu_{21}w_{,2}^2\right) -\right.$$
$$\left. - \left(R_1^{-1} + \mu_{21}R_2^{-1}\right)\mathrm{w} - \frac{\mathrm{h}_{1,1} + h_{3,1}}{2}w_{,1} - \mu_{21}\frac{h_{1,2} + h_{3,2}}{2}w_{,2}\right] +$$
$$+ B_{12}\frac{h_2 + h_3}{2}\left[u_{2,1} + \mu_{21}\mathrm{v}_{2,2} + \frac{1}{2}\left(w_{,1}^2 + \mu_{21}w_{,2}^2\right) -\right.$$
$$\left. - \left(R_1^{-1} + \mu_{21}R_2^{-1}\right)\mathrm{w} - \frac{\mathrm{h}_{2,1} + h_{3,1}}{2}w_{,1} - \mu_{21}\frac{h_{2,2} + h_{3,2}}{2}w_{,2}\right] -$$

$$
\begin{aligned}
&-(D_{11}+D_{12})(w_{,11}+\mu_{21}w_{,22})- \\
&-\frac{D_1^*}{h_3}\Big[(u_{1,1}-u_{2,1})+\mu_{21}^*(\mathrm{v}_{1,2}-\mathrm{v}_{2,2})- \\
&-\frac{h_1+h_2}{2}(w_{,11}+\mu_{21}^*w_{,22})-\frac{h_{1,1}+h_{2,1}}{2}w_{,1}- \\
&-\mu_{21}^*\frac{h_{1,2}+h_{2,2}}{2}w_{,2}\Big]-D_1^*\Big[\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1}\times \\
&\times\left(u_1+u_2-\frac{h_1+h_2}{2}w_{,1}\right)+ \\
&+\mu_{21}^*\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,2}\left(\mathrm{v}_1-\mathrm{v}_2-\frac{h_1+h_2}{2}w_{,2}\right)\Big]+f_3;
\end{aligned}
\tag{18}
$$

$$
\begin{aligned}
&M_{22}=-B_{21}\frac{h_1+h_3}{2}\Big[\mathrm{v}_{1,2}+\mu_{12}u_{1,1}+\frac{1}{2}\left(w_{,2}^2+\mu_{12}w_{,1}^2\right)- \\
&-\left(R_2^{-1}+\mu_{12}R_1^{-1}\right)-\frac{h_{1,2}+h_{3,2}}{2}w_{,2}-\mu_{12}\frac{h_{1,1}+h_{3,1}}{2}w_{,1}\Big]+ \\
&+B_{22}\frac{h_2+h_3}{2}\Big[\mathrm{v}_{2,2}+\mu_{12}u_{2,1}+\frac{1}{2}(w_{,2}^2+\mu_{12}w_{,1}^2)- \\
&-\left(R_2^{-1}+\mu_{12}R_1^{-1}\right)w-\frac{h_{2,2}+h_{3,2}}{2}w_{,2}-\mu_{12}\frac{h_{2,1}+h_{3,1}}{2}w_{,1}\Big]- \\
&-\left(D_{21}+D_{22}\right)\left(w_{,22}+\mu_{12}w_{,11}\right)-\frac{D_2^*}{h_3}\Big[\left(\mathrm{v}_{1,2}-\mathrm{v}_{2,2}\right)+ \\
&+\mu_{12}^*(u_{1,1}+u_{2,1})-\frac{h_1+h_2}{2}\left(w_{,22}+\mu_{12}^*w_{,11}\right)-\frac{h_{1,2}+h_{2,2}}{2}w_{,2}- \\
&-\mu_{12}^*\frac{h_{1,1}+h_{2,1}}{2}w_{,1}\Big]-D_2^*\Big[\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,2}\left(\mathrm{v}_1-\mathrm{v}_2-\frac{h_1+h_2}{2}w_{,2}\right)+ \\
&+\mu_{12}^*\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1}\left(u_1-u_2-\frac{h_1+h_2}{2}w_{,1}\right)\Big]+f_4;
\end{aligned}
\tag{19}
$$

$$
\begin{aligned}
&M_{12}=-B_{31}\frac{h_1+h_3}{2}\left(u_{1,2}+\mathrm{v}_{1,1}-\frac{h_{1,1}+h_{3,1}}{2}w_{,2}-\right. \\
&\left.-\frac{h_{1,2}+h_{3,2}}{2}w_{,1}+w_{,1}w_{,2}\right)+B_{32}\frac{h_2+h_3}{2}\left(u_{2,2}+\mathrm{v}_{2,1}-\right. \\
&\left.-\frac{h_{2.1}+h_{3,1}}{2}w_{,2}-\frac{h_{2,2}+h_{3,2}}{2}w_{,1}+w_{,1}w_{,2}\right)- \\
&-(D_{31}+D_{32})w_{,12}-\frac{1}{2h_3}D_3^*\Big[(u_{1,2}-u_{2,2})+(\mathrm{v}_{1,1}+\mathrm{v}_{2,1})- \\
&-(h_1+h_2)w_{,12}-\frac{h_{1,1}+h_{2,1}}{2}w_{,2}-\frac{h_{1,2}+h_{2,2}}{2}w_{,1}+ \\
&+\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1}\left(\mathrm{v}_1-\mathrm{v}_2-\frac{h_1+h_2}{2}w_{,2}\right)+ \\
&+\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,2}\left(u_1-u_2-\frac{h_1+h_2}{2}w_{,1}\right)\Big].
\end{aligned}
\tag{20}
$$

Здесь:

$$
B_{11}=\frac{E_1h_1}{1-\mu_{12}\mu_{21}};\qquad B_{12}=\frac{E_1h_2}{1-\mu_{12}\mu_{21}};
$$

$$
B_1^*=\frac{E_1^*h_3}{1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*};
$$

$$
B_{21}=\frac{E_2h_1}{1-\mu_{12}\mu_{21}};\qquad B_{22}=\frac{E_2h_2}{1-\mu_{12}\mu_{21}};
$$

$$
B_2^*=\frac{E_2^*h_3}{1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*};
$$

$$
B_{31}=G_{12}h_1;\qquad B_{32}=G_{12}h_2;
$$

$$
B_3^*=G_{12}^*h_3;
$$

$$
D_{11}=\frac{E_1h_1^3}{12(1-\mu_{12}\mu_{21})};\quad D_{21}=\frac{E\ h_1^3}{12(1-\mu_{12}\mu_{21})};
$$

$$
D_{31}=\frac{G_{12}h_1^3}{6};
$$

$$
D_{12}=\frac{E_1h_2^3}{12(1-\mu_{12}\mu_{21})};
$$

$$
D_{22}=\frac{E_2h_2^3}{12(1-\mu_{12}\mu_{21})};\quad D_{11}=\frac{G_{12}h_2^3}{6};
$$

$$
D_1^*=\frac{E_1^*h_3^3}{12(1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*)};\ D_2^*=\frac{E_2^*h_3^3}{12(1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*)};
$$

$$
D_3^*=\frac{G_{12}^*h_3^3}{6}.
\tag{21}
$$

Выражения для функций температуры записываются в виде:

$$
\begin{aligned}
&f_1=B_{11}(m_{11}+\mu_{21}m_{21})+B_{12}(m_{12}'+\mu_{21}m_{22})+ \\
&+B_1^*(m_1^*+\mu_{21}^*m_2^*);\\
&f_2=B_{21}(m_{21}+\mu_{12}m_{11})+B_{22}(m_2+\mu_{12}m_{12}')+ \\
&+B_2^*(m_2^*+\mu_{12}^*m_1^*);\\
&f_3=D_{11}(n_{11}+\mu_{21}n_{21})+D_{12}(n_{12}+\mu_{21}n_{22})+ \\
&+D_1^*(n_1^*+\mu_{21}^*n_2^*);\\
&f_4=D_{21}(n_{21}+\mu_{12}n_{11})+D_{22}(n_{22}+\mu_{12}n_{12})+ \\
&+D_2^*(n_2^*+\mu_{12}^*n_1^*),
\end{aligned}
\tag{22}
$$

где

$$
m_{11}=\frac{1}{h_1}\int_{h_3/2}^{h_3/2+h_1}\alpha_1T dz;\ m_{12}'=\frac{1}{h_2}\int_{-c/2-h_2}^{h_3/2}\alpha_1T dz;
$$

$$m_1^* = \frac{1}{h_3}\int_{-h_3/2}^{h_3/2}\alpha_1^* T dz;$$

$$m_{21} = \frac{1}{h_1}\int_{h_3/2}^{h_3/2+h_1}\alpha_2 T dz;\ m_{22} = \frac{1}{h_2}\int_{-h_3/2-h_2}^{-h_3/2}\alpha_2 T dz;$$

$$m_2^* = \frac{1}{h_3}\int_{-h_3/2}^{h_3/2}\alpha_2^* T dz;$$

$$n_{11} = \frac{12}{h_1^3}\int_{h_3/2}^{h_3/2+h_1}\alpha_1 T z dz;\quad n_{12} = \frac{12}{h_2^3}\int_{-h_3/2-h_2}^{-h_3/2}\alpha_2 T z dz;$$

$$n_1^* = \frac{12}{h_3^3}\int_{-h_3/2}^{h_3/2}\alpha_1^* T z dz;$$

$$n_{21} = \frac{12}{h_1^3}\int_{h_3/2}^{h_3/2+h_1}\alpha_2 T z dz;\quad n_{22} = \frac{12}{h_2^3}\int_{-h_3/2-h_2}^{-h_3/2}\alpha_2 T z dz;$$

$$n_2^* = \frac{12}{h_3^3}\int_{-h_3/2}^{h_3/2}\alpha_2^* T z dz. \qquad (23)$$

Для несущих слоев энергия поперечного сдвига не учитывается, для заполнителя она вводится в рассмотрение.

Исходные уравнения получим на основе вариационного принципа Лагранжа, согласно которому:

$$-\delta П + \delta A_1 + \delta A_2 = 0, \qquad (24)$$

где $\delta П$ – вариация работы внутренних сил; δA_1 – вариация работы внешней нагрузки; δA_2 – вариация работы внешних контурных усилий.

Запишем вариации работы внутренних сил упругости лопатки с учетом сдвига в заполнителе [5]:

$$\delta П = \iint_{\Omega}\{(N_{11,1} + N_{12,2} + p_1)\delta u_\alpha + (N_{22,2} + N_{12,1})\delta v_\alpha +$$
$$+\left[m_{1,1} + m_{12,1} - \frac{4}{h_3}G_{13}^*\left(u_\beta - \frac{h}{4}w_{,1}\right)\right]\delta u_\beta +$$
$$+\left[m_{2,2} + m_{12,1} - \frac{4}{h_3}G_{23}^*(v_\beta - \frac{h}{4}w_{,2})\right]\delta v_\beta + \left[(M_{11} + m_1^*)_{,11} +\right.$$
$$+(M_{22} + m_2^*)_{,22} + 2(M_{12} + m_{12}^*)_{,12} + +k_{11}N_{11} + k_{22}N_{22} -$$
$$-2k_{12}N_{12} + +(N_{11}w_{,1})_{,1} + (N_{22}w_{,2})_{,2} + (N_{12}w_{,2})_{,1} +$$
$$+(N_{12}w_{,1})_{,2} - p_1 w_{,1} - \frac{h}{h_3}G_{13}^*\left(u_\beta - \frac{h}{4}w_{,1}\right)_{,1} -$$
$$\left.-\frac{h}{h_3}G_{23}^*\left(v_\beta - \frac{h}{4}w_{,2}\right)_{,2} + q\right]\delta w\Big\}dx_1 dx_2 + \int_0^{l_1}\{N_{12}\delta u_\alpha +$$
$$+N_{22}\delta v_\alpha + m_2\delta v_\beta + m_{12}\delta u_\beta - (M_{22} + m_2^*)\delta w_{,2} +$$
$$+\left[(M_{22} + m_2^*)_{,2} + 2(M_{12} + m_{12}^*)_{,1} + N_{22}w_{,2} +\right.$$
$$\left.+N_{12}w_{,1} - \frac{h}{h_3}G_{23}^*\left(v_\beta - \frac{h}{4}w_{,2}\right)\right]\delta w\Big\}\Big|_0^{l_2}dx_1 +$$
$$+\int_0^{l_2}\{N_{11}\delta u_\alpha + N_{12}\delta v_\alpha + m_1\delta u_\beta + m_{12}\delta v_\beta -$$
$$-(M_{11} + m_1^*)\delta w_{,1} + \left[(M_{11} + m_1^*)_{,1} +\right.$$
$$+2(M_{12} + m_{12}^*)_{,2} + N_{11}w_{,1} + N_{12}w_{,2} -$$
$$\left.-\frac{h}{h_3}G_{13}^*\left(u_\alpha - \frac{h}{4}w_{,1}\right)\right]\delta w\Big\}\Big|_0^{l_1}dx_2 - 2(M_{12} + m_{12}^*)\delta w\Big|_0^{l_1}\Big|_0^{l_2} \qquad (25)$$

Здесь p_1, p_2 q – компоненты нагрузки в направлении осей x_1, x_2, z соответственно. Выпишем выражение для p_2, q следуя [3]. Если площадь поперечного сечения лопатки F постоянная по ее длине, тогда величина центробежной силы равна:

$$p_2 = \rho\omega^2 F\frac{R_2^2 - R_1^2}{2},$$

где R_1 и R_2 – радиусы корневого и внешнего сечений лопатки; ρ – плотность материала лопатки; ω – угловая скорость вращения.

Воздействие газового потока на лопатку определяется следующим образом [3]:

$$q = \frac{2\pi R}{z}\left[\left(p_1^* - p_2^*\right) + \left(c_{1a}^2\rho_1 - c_{2a}^2\rho_2\right)\right].$$

Здесь p^* – давление газа; ρ – плотность газа; c_a – осевая составляющая абсолютной скорости газа; индексы «1» и «2» означают вход и выход из лопаточного канала (ступени); z – число лопаток. Величины $m_1, m_2, m_{12}, m_1^*, m_2^*, m_{12}^*$ определяются следующим образом:

$$m_1 = N_{11}^1 - N_{11}^2 - \frac{2}{h_3}M_{11}^3;$$

$$m_2 = N_{22}^1 - N_{22}^2 - \frac{2}{h_3}M_{22}^3;$$

$$m_{12} = N_{12}^1 - N_{12}^2 - \frac{2}{h_3}M_{12}^3;$$

$$m_1^* = \frac{h_1 + h_3}{2}N_{11}^1 - \frac{h_2 + h_3}{2}N_{11}^2 +$$
$$+\frac{h_1 - h_2}{2}N_{11}^3 - \frac{h}{2h_3}M_{11}^3. \qquad (26)$$

$$m_2^* = \frac{h_1 + h_3}{2} N_{22}^1 - \frac{h_2 + h_3}{2} N_{22}^2 + \\ + \frac{h_1 - h_2}{2} N_{22}^3 - \frac{h}{2h_3} M_{22}^3;$$

$$m_{12}^* = \frac{h_1 + h_3}{2} N_{12}^1 - \frac{h_2 + h_3}{2} N_{12}^2 + \\ + \frac{h_1 - h_2}{2} N_{12}^3 - \frac{h}{2h_3} M_{12}^3. \quad (27)$$

Первый интеграл в выражении (25) доставляет дифференциальные уравнения задачи, второй и третий – граничные условия.
Выпишем уравнения равновесия:

$$N_{11,1} + N_{12,2} = -p_1; \quad (28)$$

$$N_{22,2} + N_{12,1} = 0; \quad (29)$$

$$m_{1,1} + m_{12,2} - \frac{4}{h_3} G_{13}^* \left(u_\beta - \frac{h}{4} w_{,1} \right) = 0; \quad (30)$$

$$m_{2,2} + m_{12,1} - \frac{4}{h_3} G_{23}^* \left(\nu_\beta - \frac{h}{4} w_{,2} \right) = 0; \quad (31)$$

$$\left(M_{11} - \frac{h_1 - h_2}{4} N_{11} \right)_{,11} + \left(M_{22} + \frac{h_1 - h_2}{4} N_{22} \right)_{,22} + \\ + 2 \left(M_{12} - \frac{h_1 - h_2}{4} N_{12} \right)_{,12} + N_{11}(w_{,11} + R_1^{-1}) + \\ + N_{22}(w_{,22} + R_2^{-1}) + \\ + 2N_{12} w_{,12} - p_1 w_{,1} + q = 0. \quad (32)$$

При этом последнее уравнение было получено с учетом уравнений (28)-(31).
Учитывая выражение для функций изменения толщины лопатки по ее длине $h(\xi, \eta)$ и толщины заполнителя $h_3(\xi, \eta)$ – выражения (1)-(2), получим:

$$B_{11,1} = B_{12,1} = B_{21,1} = B_{22,1} = B_{31,1} = B_{32,1} = 0,$$
$$D_{12,1} = D_{22,1} = D_{32,1} = D_{11,1} = D_{21,1} = D_{31,1} = 0.$$

Таким образом, дифференцироваться по координате ξ будут только B_1^*, B_2^*, B_3^* и D_1^*, D_2^*, D_3^*. По координате η величины B_{ik} и D_{ik} не дифференцируются. Температурные функции f_1, f_2, f_3, f_4 будут дифференцироваться по обоим координатам, поскольку предполагается температурное поле общего вида $T = T(x, y, z)$.
Подставляя в уравнения (28)-(32) выражения (26), (27) и (15)-(20), получим разрешающую систему пяти дифференциальных уравнений в частных производных эллиптического типа в перемещениях 12-го порядка для трехслойных конструктивно-ортотропных пологих оболочек переменной жесткости при конечных смещениях относительно функций w, $u_1, \mathrm{u}_2, \mathrm{v}_1, \mathrm{v}_2$.

$$(B_{11} + 0{,}5B_1^*)u_{1,11} + (B_{31} + 0{,}5B_3^*)u_{1,22} + 0{,}5B_{1,1}^* u_{1,1} + (B_{12} + 0{,}5B_1^*)u_{2,11} + (B_{32} + 0{,}5B_3^*)u_{2,22} + 0{,}5B_{1,1}^* u_{2,1} + \\ + \left[(\nu_{21} B_{11} + B_{31}) + 0{,}5(\nu_{21}^* B_1^* + B_3^*) \right] \nu_{1,12} + 0{,}5\nu_{21}^* B_{1,1}^* v_{1,2} + \left[(\nu_{21} B_{12} + B_{32}) + 0{,}5(\nu_{21}^* B_1^* + B_3^*) \right] v_{2,12} + \\ + 0{,}5\nu_{21}^* B_{1,1}^* v_{2,2} + 0{,}5h_{3,1}(B_{12} - B_{11})\, w_{,11} + 0{,}5h_{3,1}(B_{32} - B_{31}) w_{,22} - R^{-1} \left[(B_{11} + B_{12} + B_1^*) + \right. \\ \left. + 0{,}5h_{3,11}(B_{11} - B_{12}) \right] w_{,1} - R^{-1} B_{1,1}^* w = f_{1,1} - p_1; \quad (33)$$

$$[(B_{31} + \nu_{12} B_{21}) + 0{,}5(B_3^* + \nu_{12}^* B_2^*)] u_{1,12} + 0{,}5B_{3,1}^* u_{1,2} + [(B_{32} + \nu_{12} B_{22}) + 0{,}5(B_3^* + \nu_{12}^* B_2^*)]\, \mathrm{u}_{2,12} + 0{,}5B_{3,1}^* u_{2,2} + \\ + (B_{31} + 0{,}5B_3^*)\, \mathrm{v}_{1,11} + (B_{21} + 0{,}5B_2^*)\, \mathrm{v}_{1,22} + 0{,}5B_{3,1}^* v_{1,1} + (B_{32} + 0{,}5B_3^*)\, \mathrm{v}_{2,11} + (B_{22} + 0{,}5B_2^*)\, \mathrm{v}_{2,22} + 0{,}5B_{3,1}^* v_{2,1} + \\ + 0{,}5h_{3,1}(B_{12} - B_{11})\, \mathrm{w}_{,11} + 0{,}5h_{3,1}(B_{32} - B_{31})\, \mathrm{w}_{,22} - R^{-1}[(B_{11} + B_{12} + B_1^*) + 0{,}5h_{3,11}(B_{11} - B_{12})]\, \mathrm{w}_{,1} - R^{-1} B_{1,1}^* w = \\ = f_{2,2} - p_2; \quad (34)$$

$$(6B_{11}+B_1^*)u_{1,11}+(6B_{31}+B_3^*)u_{1,22}+(B_{1,1}^*-h_3^{-1}h_{3,1}B_1^*)u_{1,1}+[h_3^{-1}h_{3,1}B_{1,1}^*+h_3^{-2}h_{3,1}^2B_1^*+$$
$$+h_3^{-1}B_1^*(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)+12h_3^{-1}G_{13}^*]u_1-(6B_{12}+B_1^*)\,u_{2,11}-(6B_{32}+B_3^*)\,u_{2,22}-$$
$$-(B_{1,1}^*-h_3^{-1}h_{3,1}B_1^*)u_{2,1}+[h_3^{-1}h_{3,1}B_{1,1}^*+h_3^{-1}B_1^*(h_{3,11}-h_3^{-1}h_{3,1}^2)+12h_3^{-1}G_{13}^*]u_2+[(6B_{31}+B_3^*)+$$
$$+(6\nu_{21}B_{11}+\nu_{21}^*B_1^*)]\,v_{1,12}+(\nu_{21}^*B_{1,1}^*-h_3^{-2}h_{3,1}B_3^*)\,v_{1,2}+[(\nu_{21}^*B_1^*-B_3^*)-6(\nu_{21}B_{12}+B_{32})]\,v_{2,12}-$$
$$-(\nu_{21}^*B_{1,1}^*-h_3^{-2}h_{3,1}B_3^*)\,v_{2,2}-h_1B_1^*w_{,111}-h_1(\nu_{21}^*B_1^*+2B_3^*)\,w_{,12}-[h_1(B_{1,1}^*-h_3^{-1}h_{3,1}B_1^*)+$$
$$+0{,}5h_{3,1}(B_{11}+B_{12})]\,w_{,11}-[h_1(\nu_{21}^*B_{1,1}^*-h_3^{-2}h_{3,1}B_3^*)+0{,}5h_{3,1}(B_{3,1}+B_{32})]\,w_{,22}+$$
$$+[h_1(h_3^{-1}h_{3,1}B_{1,1}^*+h_3^{-2}h_{3,1}^2B_1^*)+h_1h_3^{-1}B_1^*(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)+6G_{13}^*hh_3^{-1}-$$
$$-0{,}5h_{3,11}(B_{11}+B_{12})]\,w_{,1}=-T_1; \qquad (35)$$

$$[6(B_{31}+\nu_{12}B_{21})+B_3^*+\nu_{12}^*B_2^*]\,u_{1,12}+(6\nu_{12}^*h_3^{-2}h_{3,1}D_2^*+B_{3,1}^*)\,u_{1,2}-[6(B_{32}+\nu_{12}B_{22})+B_3^*+\nu_{12}^*B_2^*]\,u_{2,12}-$$
$$-(6\nu_{12}^*h_3^{-2}h_{3,1}D_2^*+B_{3,1}^*)\,u_{2,2}+(6B_{31}+B_3^*)\,v_{1,11}+(6B_{21}+B_2^*)\,v_{1,22}+(B_{3,1}^*-h_3^{-2}h_{3,1}B_3^*)\,v_{1,1}+$$
$$+[h_3^{-2}(2h_3^{-1}h_{3,1}^2-h_{3,11})\,B_3^*-h_3^{-2}h_{3,1}B_{3,1}^*-12h_3^{-1}G_{23}^*]\,v_1-(6B_{32}+B_3^*)\,v_{2,11}-(6B_{22}+B_2^*)\,v_{2,22}+$$
$$+(h_3^{-2}h_{3,1}B_3^*-B_{3,1}^*)\,v_{2,1}+[h_3^{-2}h_{3,1}B_{3,1}^*-h_3^{-2}B_3^*(2h_3^{-1}h_{3,1}^2-h_{3,11})+12h_3^{-1}G_{23}^*]\,v_2-h_1B_2^*w_{,222}-$$
$$-h_1(\nu_{12}^*B_2^*-2B_3^*)\,w_{,122}+[h_1(B_3^*h_3^{-2}h_{3,1}-2B_{3,1}^*-6\nu_{12}^*h_3^{-2}h_{3,1}D_2^*)-0{,}5h_{3,1}(\nu_{12}B_{21}+$$
$$+\nu_{12}B_{22}+B_{31}+B_{32})]\,w_{,12}+[h_3^{-2}h_{3,1}h_1B_{3,1}^*-h_3^{-2}B_3^*(2h_3^{-1}h_{3,1}^2-h_{3,11})\,h_1+6h_3^{-1}hG_{23}^*-$$
$$-0{,}5h_{3,11}(B_{31}+B_{32})]\,w_{,2}=-T_2; \qquad (36)$$

$$(a_1B_{11}+h_3^{-1}D_1^*)\,u_{1,111}+[a_1(\nu_{21}B_{11}+2B_{31})+h_3^{-1}(\nu_{21}^*D_1^*+4D_3^*)]\,u_{1,122}+h_{3,1}(B_{11}-3h_3^{-2}D_1^*)\,u_{1,11}-$$
$$-[h_3^{-2}h_{3,1}(\nu_{21}^*D_1^*+4D_3^*)-h_{3,1}B_{31}-4h_3^{-1}D_{3,1}^*]\,u_{1,22}-[3h_3^{-2}(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)\,D_1^*+4h_3^{-2}h_{3,1}D_{1,1}^*-$$
$$-h_3^{-1}D_{1,11}^*+R^{-1}(B_{11}+0{,}5B_1^*)-0{,}5h_{3,11}B_{11}]\,u_{1,1}-h_3^{-2}[h_{3,1}D_{1,11}^*+2(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)\,D_{1,1}^*+$$
$$+(4h_3^{-2}h_{3,1}^2-2h_3^{-1}h_{3,11}-4h_3^{-1}h_{3,1}h_{3,11}+2h_3^{-2}h_{3,1}^3+h_{3,111})\,D_1^*]\,u_1-(a_1B_{11}+h_3^{-1}D_1^*)\,u_{2,111}-$$
$$-[a_1(\nu_{21}B_{11}+2B_{31})+h_3^{-1}(\nu_{21}^*D_1^*+4D_3^*)]\,u_{2,122}-h_{3,1}(B_{11}-3h_3^{-2}D_1^*)\,u_{2,11}+$$
$$+\left[h_3^{-2}h_{3,1}(\nu_{21}^*D_1^*+4D_3^*)-h_{3,1}B_{31}-4h_3^{-1}D_{3,1}^*\right]u_{2,22}+[3h_3^{-2}(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)\,D_1^*+4h_3^{-2}h_{3,1}D_{1,1}^*-$$
$$-h_3^{-1}D_{1,11}^*-R^{-1}(B_{12}+0{,}5B_1^*)-0{,}5h_{3,11}B_{11}]\,u_{2,1}+h_3^{-2}[h_{3,1}D_{1,11}^*+2(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)\,D_{1,1}^*+$$
$$+(4h_3^{-2}h_{3,1}^2-2h_3^{-1}h_{3,11}-4h_3^{-1}h_{3,1}h_{3,11}+2h_3^{-2}h_{3,1}^3+h_{3,111})\,D_1^*]\,u_2+[a_1(\nu_{21}B_{11}+2B_{31})+$$
$$+h_3^{-1}(\nu_{21}^*D_1^*+4D_3^*)]\,v_{1,112}+(a_1B_{22}+h_3^{-1}D_2^*)\,v_{1,222}-[2\nu_{21}^*h_3^{-2}h_{3,1}D_1^*-4h_3^{-1}D_{3,1}^*+8h_3^{-2}h_{3,1}D_3^*-$$
$$-h_{3,1}(\nu_{21}B_{11}+B_{31})]\,v_{1,12}-[4h_3^{-2}(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)\,D_3^*+4h_3^{-2}h_{3,1}D_{3,1}^*+\nu_{21}^*h_3^{-2}(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)\,D_1^*+$$
$$+2\nu_{21}^*h_3^{-2}h_{3,1}D_{1,1}^*-\nu_{21}^*h_3^{-1}D_{1,11}^*+\nu_{21}B_{11}(R^{-1}-0{,}5h_{3,11})+0{,}5\nu_{21}^*R^{-1}B_1^*]\,v_{1,2}-$$

$$-[a_1(\nu_{21}B_{11}+2B_{31})+h_3^{-1}(\nu_{21}^*D_1^*+4D_3^*)]\,\mathrm{v}_{,112}-(a_1B_{22}+h_3^{-1}D_2^*)\,\mathrm{v}_{,222}+$$
$$+[2\nu_{21}^*h_3^{-2}h_{3,1}D_1^*-4h_3^{-1}D_{3,1}^*+8h_3^{-2}h_{3,1}D_3^*-h_{3,1}(\nu_{21}B_{11}+B_{31})]\,\mathrm{v}_{,12}+[4h_3^{-2}(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)\,\mathrm{D}_3^*+$$
$$+4h_3^{-2}h_{3,1}D_{3,1}^*+\nu_{21}^*h_3^{-2}(h_{3,11}-2h_3^{-1}h_{3,1}^2)\,\mathrm{D}_1^*+2\nu_{21}^*h_3^{-2}h_{3,1}D_{1,1}^*-\nu_{21}^*h_3^{-1}D_{1,11}^*-\nu_{21}(R^{-1}B_{12}+0{,}5h_{3,11}B_{11})-$$
$$-0{,}5\nu_{21}^*R^{-1}B_1^*]\,\mathrm{v}_{,22}+(2D_{11}-h_1h_3^{-1}D_1^*)\,\mathrm{w}_{,1111}+[4(\nu_{21}D_{11}+D_{31})-2h_1h_3^{-1}(\nu_{21}^*D_1^*+4D_3^*)]\,\mathrm{w}_{,1122}+$$
$$+(2D_{22}-h_1h_3^{-1}D_2^*)\,\mathrm{w}_{,2222}+h_{3,1}(3h_1h_3^{-2}D_1^*-a_1B_{11})\mathrm{w}_{,111}-[a_1h_{3,1}(\nu_{21}B_{11}+2B_{31})-2\nu_{21}^*h_1h_3^{-2}h_{3,1}D_1^*+$$
$$+8h_1h_3^{-1}D_{3,1}^*-12h_1h_3^{-2}h_{3,1}D_3^*-\nu_{12}^*h_1h_3^{-2}h_{3,1}D_2^*]\,\mathrm{w}_{,122}-[B_{11}(h_{3,1}^2+2a_1h_{3,11})+h_1h_3^{-1}D_{1,11}^*-$$
$$-4h_1h_3^{-2}h_{3,1}D_{1,1}^*+3h_1h_3^{-2}(2h_3^{-1}h_{3,1}^2-h_{3,11})\,\mathrm{D}_1^*-f_1]\,\mathrm{w}_{,11}-[\nu_{21}^*h_1h_3^{-1}D_{1,11}^*-2\nu_{21}^*h_1h_3^{-2}h_{3,1}D_{1,1}^*+$$
$$+\nu_{21}^*h_1h_3^{-2}(2h_3^{-1}h_{3,1}^2-h_{3,11})\,\mathrm{D}_1^*-4h_1h_3^{-2}h_{3,1}D_{3,1}^*+4h_1h_3^{-2}(2h_3^{-1}h_{3,1}^2-h_{3,11})\,\mathrm{D}_3^*+$$
$$+B_{31}(h_{3,11}h_1+h_3h_{3,11}+h_{3,1}^2)-f_2]\,\mathrm{w}_{,22}-[0{,}5B_{11}(h_1h_{3,1}+h_3h_{3,111}+3h_{3,1}h_{3,11}-h_3^{-2}h_{3,1}D_{1,11}^*+$$
$$+4h_1h_3^{-3}h_{3,1}^2D_{1,1}^*+h_1h_3^{-2}(6h_3^{-1}h_{3,1}h_{3,11}-6h_3^{-2}h_{3,1}^3-h_{3,111})\,\mathrm{D}_1^*+0{,}5h_{3,1}R^{-1}(B_{12}-B_{11})-p_1]\,\mathrm{w}_{,1}+$$
$$+R^{-2}(B_{11}+B_{12}+B_1^*)\,\mathrm{w}=\mathrm{q}+\mathrm{f}_{3,11}+f_{4,22}-R^{-1}f_1. \qquad (37)$$

В уравнениях (35) и (36) выражения T_1 и T_2 имеют вид:

$$T_1=6B_{12}(m'_{12,1}+\nu_{21}m_{22,1})-6B_{11}(m_{11,1}+\nu_{21}m_{21,1})-$$
$$-(B_{1,1}^*h_3+B_1^*h_{3,1})(n_1^*+\nu_{21}^*n_2^*)-B_1^*h_3(n_{1,1}^*+\nu_{21}^*n_{2,1}^*);$$
$$T_2=6D_2^*(n_{2,2}^*+\nu_{12}^*n_{1,2})-6B_{21}(m_{21,1}+\nu_{12}m_{11,2})-$$
$$-6B_{22}(m_{22,2}+\nu_{12}m'_{12,2}). \qquad (38)$$

Граничные условия

Вариационный функционал (25) доставляет также и краевые условия. Первый одинарный интеграл доставляет граничные условия по краям лопатки, прилегающим к замковому устройству $(\eta=0)$ и полкам $(\eta=1)$.

Так как вариации независимых переменных произвольны, из уравнения (25) получим:

$$u_\alpha=v_\alpha=u_\beta=v_\beta=w=w_{,2}=0. \qquad (39)$$

Учитывая выражения (14) получим:

$$u_1=u_2=v_1=v_2=w=w_{,2}=0. \qquad (40)$$

Второй одинарный интеграл дает граничные условия по входной $(\xi=0)$ и выходной $(\xi=1)$ кромкам лопатки.

$$N_{11}=N_{12}=0; \qquad m_1=m_{12}=0;$$
$$M_{11}+m_1^*=0;$$
$$(M_{11}+m_1^*)_{,1}+2(M_{12}+m_{12}^*)_{,2}+N_{11}w_{,1}+$$
$$+N_{12}w_{,2}-\frac{h}{h_3}G_{13}^*\left(u_\alpha-\frac{h}{4}w_{,1}\right)=0,$$

В функциях перемещений получим:

$$B_{11}[u_{1,1}+\nu_{21}v_{1,2}-R^{-1}w]+B_{12}[u_{2,1}+\nu_{21}v_{2,2}-R^{-1}w]+B_1^*\left[\frac{u_{1,1}+u_{2,1}}{2}+\nu_{21}^*\frac{v_{1,2}+v_{2,2}}{2}-R^{-1}w\right]-f_1=0;$$
$$B_{31}(u_{1,2}+v_{1,1})+B_{32}(u_{2,2}+v_{2,1})+B_3^*\left(\frac{u_{1,2}+u_{2,2}}{2}+\frac{v_{1,1}+v_{2,1}}{2}\right)=0;$$

$$B_{11}(u_{1,1}+\nu_{21}v_{1,2}-R^{-1}w)-B_{11}(m_{11}+\nu_{21}m_{21})-B_{12}(u_{2,1}+\nu_{21}v_{2,2}-k^{-1}w)+B_{12}(m'_{12}+\nu_{21}m_{22})+$$
$$+2\frac{D_1^*}{h_3^2}\left[(u_{1,1}-u_{2,1})+\nu_{21}^*(v_{1,2}-v_{2,2})-h_1(w_{,11}+\nu_{21}^*w_{,22})\right]+2\frac{D_1^*}{h_3}\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1}[u_1-u_2-h_1w_{,1}]-2\frac{D_1^*}{h_3}(n_1^*+\nu_{21}^*n_2^*)=0;$$

$$B_{31}(v_{1,1}+u_{1,2})-B_{32}(v_{2,1}+u_{2,2})+\frac{B_3^*}{6}\left[(u_{1,2}-u_{2,2})+(v_{1,1}-v_{2,1})-2h_1w_{,12}+\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1}(v_1-v_2-h_1w_{,2})\right]=0;$$

$$-B_{11}\frac{h_1+h_3}{2}\left(u_{1,1}+\nu_{21}v_{1,2}-\frac{h_{3,1}}{2}w_{,1}\right)+B_{12}\frac{h_1+h_3}{2}\left(u_{2,1}+\nu_{21}v_{2,2}+\frac{h_{3,1}}{2}w_{,1}\right)-2D_{11}(w_{,11}+\nu_{21}w_{,22})-$$

$$-\frac{D_1^*}{h_3}\left[(u_{1,1}-u_{2,1})+\nu_{21}^*(v_{1,2}-v_{2,2})-h_1(w_{,11}+\nu_{21}^*w_{,22})\right]-D_1^*\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1}[u_1-u_2-h_1w_{,1}]+f_3+m_1^*=0;$$

$$B_{11}\frac{h_1+h_3}{2}[u_{2,11}+\nu_{21}v_{2,12}+h_{3,11}w_{,1}+h_{3,1}w_{,11}-u_{1,11}-\nu_{21}v_{1,12}]+B_{11}\frac{h_{3,1}}{2}[u_{2,1}+\nu_{21}v_{2,2}+h_{3,1}w_{,1}-$$

$$-u_{1,1}-\nu_{21}v_{1,2}]-2D_{11}(w_{,111}+\nu_{21}w_{,122})-[h_3^{-1}D_{1,1}^*-h_3^{-2}h_{3,1}D_1^*][(u_{1,1}-u_{2,1})+\nu_{21}^*(v_{1,2}-v_{2,2})-$$

$$-h_1(w_{,11}+\nu_{21}^*w_{,22})]-h_3^{-1}D_1^*[(u_{1,11}-u_{2,11})+\nu_{21}^*(v_{1,12}-v_{2,12})-h_1(w_{,111}+\nu_{21}^*w_{,122})]+$$

$$+h_3^{-2}h_{3,1}D_{1,1}^*[(u_1-u_2-h_1w_{,1})-h_3^{-2}D_1^*(2h_{3,1}^2h_3^{-1}-h_{3,11})(u_1-u_2-h_1w_{,1})+$$

$$+h_3^{-2}h_{3,1}D_1^*(u_{1,1}-u_{2,1}-h_1w_{,11})+f_{3,1}+m_{1,1}^*+2B_{31}\frac{h_1+h_3}{2}[v_{2,12}+u_{2,22}-v_{1,12}-u_{1,22}+h_{3,1}w_{,22}]-$$

$$-4D_{31}w_{,122}-4D_3^*h_3^{-1}[(u_{1,22}-u_{2,22})+(v_{1,12}-v_{2,12})-2h_1w_{,122}-h_3^{-2}h_{3,1}(v_{1,2}-v_{2,2}-h_1w_{,22})]+$$

$$+2m_{12,2}^*-f_1w_{,1}-\frac{h}{h_3}G_{13}^*\left[\frac{u_1+u_2}{2}-\frac{h}{4}w_{,1}\right]=0 \qquad (41)$$

Запишем выражения для напряжений. Из выражений (9) и (10) получим напряжения:
– в верхнем несущем слое

$$\sigma_{11}^1=\frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}\left[u_{1,1}-R^{-1}w+\nu_{21}v_{1,2}--(\alpha_1+\nu_{21}\alpha_2)T\right]$$

$$\sigma_{22}^1=\frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}\left[u_{1,2}+\nu_{12}(u_{2,1}-R^{-1}w)--(\alpha_2+\nu_{12}\alpha_1)T\right]$$

$$\tau_{12}^1=G(v_{1,1}+u_{1,2}); \qquad (42)$$

– в нижнем несущем слое

$$\sigma_{11}^2=\frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}\left[u_{2,1}+\nu_{21}v_{2,2}-R^{-1}w--(\alpha_1+\nu_{21}\alpha_2)T\right];$$

$$\sigma_{22}^2=\frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}\left[u_{2,2}+\nu_{12}(u_{2,1}-R^{-1}w)--(\alpha_2+\nu_{12}\alpha_1)T\right];$$

$$\tau_{12}^2=G(v_{2,1}+u_{2,2}); \qquad (43)$$

– в заполнителе

$$\tau_{1z}=G_{13}^*\left[\frac{1}{c}(u_1-u_2-h_1w_{,1})\right];$$

$$\tau_{2z}=G_{23}^*\left[\frac{1}{c}(v_1-v_2-h_1w_{,2})\right]. \qquad (44)$$

В дальнейшем, вводя безразмерные функции перемещений по формулам:

$$\bar{u}_1=\frac{u_1}{h_0}; \quad \bar{u}_2=\frac{u_2}{h_0}; \quad \bar{v}_1=\frac{v_1}{h_0};$$

$$\bar{v}_2=\frac{v_2}{h_0}; \quad \bar{w}=\frac{w}{h_0}, \qquad (45)$$

исходную систему дифференциальных уравнений (33)-(37), а такие граничные условия (40) и (41) представляем в безразмерном виде.

Решение задачи Дирихле для систем эллиптических уравнений

К решению задачи Дирихле для системы уравнений эллиптического типа применяется метод интегральных соотношений Дородницына [6-7]. В соответствии с методом исходная система уравнений представляется в дивергентной форме:

$$\frac{\partial\bar{X}}{\partial\xi}+\frac{\partial\bar{Y}}{\partial\eta}+\bar{L}=0; \qquad (46)$$

$$\bar{X}=\{X_i\}=\{\bar{u}_1,\bar{u}_2,\bar{v}_1,\bar{v}_2,\bar{w},z_1,z_2,...,z_7\};$$

$$\bar{Y}=B_0\bar{X}+B_1\bar{X}_{,2}+B_2\bar{X}_{,22}+B_3\bar{X}_{,222};$$

$$\bar{L}=B\bar{X}+\bar{b}.$$

Здесь:

$z_1 = \overline{u}_{1,1}$; $z_2 = \overline{u}_{2,1}$; $z_3 = \overline{v}_{1,1}$;
$z_4 = \overline{v}_{2,1}$; $z_5 = \overline{w}_{,1}$; $z_6 = \overline{w}_{,11}$;
$z_7 = \overline{w}_{,111}$.

В соответствии с методом решение системы уравнений (46) ищем в виде:

$$X_i(\xi,\eta) = \begin{cases} \sum_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi) P_j(\xi,\eta) & (i = 5,\ 10,\ 11,\ 12); \\ \sum_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi) P_{j,2}(\xi,\eta) & (i = 1,\ 2,\ 3,\ 4); \\ \sum_{j=1}^{n} X_{ij}(\xi) P_{j,22}(\xi,\eta) & (i = 6,\ 7,\ 8,\ 9), \end{cases} \quad (47)$$

где, как и ранее в качестве системы аппроксимирующих функций выбираются ортогональные многочлены Якоби $P_j(\xi,\eta)$ [8, 9].

Остановимся более подробно на выборе аппроксимирующих функций.

В настоящем исследовании в качестве системы аппроксимирующих функций $\mathrm{P_j}(\eta)$ выбираются ортогональные полиномы, являющиеся частным случаем более общей системы ортогональных полиномов $\mathrm{P_j}(\xi,\eta)$ построенных для косых краев оболочек [10, 11]:

$$P_j(\xi,\eta) = P_1(\xi,\eta)\sum_{j=1}^{n}\left[\eta - \frac{(1+\alpha)r}{2}\right]^{j-1}; \quad (48)$$

$$P_1(\xi,\eta) = \eta^4 - 2(1+\alpha)r\eta^3 + (1+4\alpha+\alpha^2)r^2\eta^2 - $$
$$- 2\alpha(1+\alpha)r^3\xi + \alpha^2\eta^4;$$
$$(r = 1 + km\eta).$$

Полиномы $\mathrm{P_j}(\eta)$ получают из выражений (48) при $\alpha = 0$ и r = 1.

В этом случае имеем для полиномов $\mathrm{P_j}(\eta)$:

$$P_1(\eta) = \eta^4 - 2\eta^3 + \eta^2;$$
$$P_2(\eta) = \eta^5 - \frac{5}{2}\eta^4 + 2\eta^3 - \frac{1}{2}\eta^2. \quad (49)$$

Остановимся на свойствах полиномов $\mathrm{P_j}(\eta)$. Полиномы $\mathrm{P_j}(\eta)$ на отрезке [0, 1] удовлетворяют условиям ортогональности:

$$(P_i, P_k) = \int_0^1 P_1 P_k \, d\eta = 0 \qquad \text{при } i \neq k.$$

Они образуют систему линейно-независимых функций и удовлетворяют граничным условиям (40).

Построенные полиномы имеют еще одно важное свойство: их первые и вторые производные также ортогональны. Для доказательства рассмотрим величину

$$\cos(P_i, P_j) = \frac{(P_i, P_j)}{\|P_i\|\|P_j\|},$$

при этом полиномы P_i и P_j рассматриваются как обобщенные векторы в гильбертовом пространстве L_2 [8].

При конкретных значениях, для полиномов (49) получаем:

$\cos(P_1, P_2) = 0$; $\cos(P_{1,2}, P_{2,2}) = 0$;
$\cos(P_{1,22}, P_{2,22}) = 0$,

что соответствует углам, равным 90°.

Ограничиваясь двухчленным приближением и выбирая в качестве весовых функций также степенные полиномы $P_j(\eta)$ и их производные, после применения процедуры метода интегральных соотношений к исходной системе уравнений (46), получим систему обыкновенных дифференциальных уравнений порядка 12n (n = 2) с переменными коэффициентами для температурного поля общего вида.

Итак, мы от системы эллиптических уравнений в частных производных перешли к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Далее к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений применяется модифицированный метод последовательных приближений [10-12]. С целью ускорения сходимости решения был использован метод телескопического сдвига степенного ряда Ланцоша, в соответствии с которым ряды Мак-Лорена представлялись через смещенные полиномы Чебышева [13].

Модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева

Представим полученную систему обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами в виде системы уравнений 1-го порядка в нормальной форме Коши:

$$\frac{\mathrm{dX_m}}{\mathrm{d}\xi} = \sum_{v=1}^{S} B_{v,m} X_v + f_m \ (m = 1, 2,.., s). \quad (50)$$

В соответствии с методом переменные ко-

эффициенты $B_{v,m}$ и свободные члены f_m представим через смещенные полиномы Чебышева:

$$B_{v,m} = \sum_{r=0}^{q} b_{v,m,r} d_r^{-1} \sum_{k=0}^{r} a_k T_k^*(\xi);$$

$$f_m = \sum_{r=0}^{q} f_{m,r} (dr \cdot r!)^{-1} \sum_{k=0}^{k} a_k T_k^*(\xi). \qquad (51)$$

Здесь q – степень интерполяционного полинома; a_k – коэффициенты разложения ξ^r в ряд по многочленам Чебышева $T_k^*(\xi)$. В выражениях (63) $d_r = 1$ для $r = 0$ и $d_r = 2^{2r-1}$ для остальных r.

Общее решение системы уравнений (50) запишем следующим образом [12]:

$$X_m = \sum_{\mu=1}^{S} C_\mu \left[d_0^{-1} a_0 T_0^*(\xi)\delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{m,\mu,n} \right] +$$

$$+ \sum_{j=0}^{q} t_{m,j,0} \left[d_{j+1}(j+1)! \right]^{-1} \sum_{k=0}^{j+1} a_k T_k^*(\xi) + \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n}$$

.(52)

В выражении (52) $t_{m,j,0} = f_{m,r}$ при $j = r$; μ – номер фундаментальной функции; C_μ – постоянные интегрирования.

В решении (52) $\delta = 1$, если $m = \mu$ и $\delta = 0$ для остальных μ.

Первое приближение $X_{m,\mu,1}$ получается из подстановки нулевого приближения: $d_0^{-1} a_0 T_0^*(\xi)$ в правую часть однородной системы уравнений:

$$\frac{dX_m}{d\xi} = \sum_{v=1}^{S} B_{v,m} X_v .$$

Последующие приближения осуществляются по формулам:

$$X_{m,\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,\mu,n,j} \left[d_{n+j-1}(n+j-1)! \right]^{-1} \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\xi)$$

;

$$X_{m,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,n,j} \left[d_{n+j-1}(n+j-1)! \right]^{-1} \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\xi),$$

где $\beta = n(q+3) - 2$. (53)

Системы фундаментальных функций (53) являются равномерными сходящимися рядами, при этом коэффициенты $t_{m,\mu,n,j}$ и $t_{m,n,j}$ определяют через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

$$t_{m,\mu,n,j} = \sum_{v=1}^{S} \sum_{r=0}^{q} b_{v,m,r} \cdot t_{v,\mu,n-1,j-r} (n+j-1)^{-1} \times$$

$$\times \prod_{\gamma=0}^{r} (n + j - 1 - \lambda);$$

$$t_{m,n,j} = \sum_{v=1}^{S} \sum_{r=0}^{q} b_{v,m,r} \cdot t_{v,n-1,j-r} (n+j)^{-1} \prod_{\gamma=0}^{r} (n+j-\gamma).$$

Постоянные C_μ, входящие в общем решении (52) находятся из граничных условий по входной и выходной кромкам лопатки (41).

Выводы

1. Разработаны математическая модель и алгоритм решения задачи термоупругости для охлаждаемых лопаток с полками на основе конструктивно-ортотропных трехслойных оболочек переменной жесткости газотурбинных установок.
2. При построении модели лопатка схематизируется как конструктивно-ортотропная трехслойная оболочка переменной жесткости. Для аппроксимации профиля лопатки использовались кубические сплайны.
3. Аналитическое решение задачи основано на применении метода интегральных соотношений Дородницына и модифицированного метода последовательных приближений, разработанного проф.В.А.Пухлий [10-12].
4. Для ускорения сходимости предложенного решения применяется метод телескопического сдвига степенных рядов Ланцоша, при котором ряды Мак-Лорена представляются через многочлены Чебышева.

Список литературы

1. Пухлий В.А., Пухлий К.В. Термоупругость рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок на основе теории трехслойных конструктивно-ортотропных оболочек. – Энергетические установки и технологии, 2019, том 5, №4, С.50 – 68.
2. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – Киев: Наукова думка, 1970. – 304 с.
3. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей. – М.: Машиностроение, 1974. – 520 с.
4. Прочность, устойчивость, колебания. / Справочник под ред. И.А.Биргера и Я.Г.Пановко // М.: Машиностроение, 1968, том 2, с.245-326.
5. Пухлий В.А. Трехслойные и ортотропные оболочки переменной жесткости. Теория и приложения. // Пухлий В.А. // Прикладная механика, 1980, том 16, №9, с.48-55.
6. Дородницын А.А. Об одном методе численного решения некоторых нелинейных задач аэрогидродинамики. – В кн.: Труды 3-го Всес. матем. съезда, том III. – М.: Изд-во АН СССР, 1958, с.447-453.

7. Дородницын А.А. Об одном методе решения уравнений ламинарного пограничного слоя. – Журн. прикл. матем. и техн. физики, 1960, №3, с.111-118.
8. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики. Том 1. – М.: Гостехиздат, 1953.
9. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации. – М.: Изд-во «Мир», 1980. – 510 с.
10. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – Журн. вычислит. матем. и матем физики, 1978, том 18, №5, с.1275-1282.
11. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики. – Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11. – с.2039-2043.
12. Pukhliy V.A. Thermoelasticity of working and nozzle blades of gas turbine engines and installations. – 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. (ICTAM-2020) – Milano, Italy, 2020.
13. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа. – М.: Физматгиз, 1961. – 524 с.

References

1. Pukhli V.A., Pukhli K.V. Thermoelasticity of the working blades of gas turbine and combined installations based on the theory of three-layer structural and orthotropic shells. – Power plants and technologies, 2019, volume 5, No. 4, P.50 – 68.
2. Kovalenko A.D. The basics of thermoelasticity. - Kiev: Naukova Dumka, 1970 .– 304 p.
3. Skubachevsky G.S. Aircraft gas turbine engines. Design and calculation of parts. – M.: Mechanical Engineering, 1974. – 520 p.
4. Strength, stability, vibrations. / Reference book under the editorship of I.A. Birger and Ya.G. Panovko // M .: Mechanical Engineering, 1968, volume 2, p. 245-326.
5. Pukhliy V.A. Three-layer and orthotropic shells of variable stiffness. Theory and applications. // Pukhly V.A. // Applied Mechanics, 1980, Volume 16, No. 9, pp. 48-55.
6. Dorodnitsyn A.A. About one method of numerical solution of some nonlinear problems of aerohydrodynamics. - In the book: Proceedings of the 3rd Vses. mate. Congress, Volume III. - M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, p. 447-453.
7. Dorodnitsyn A.A. On a method for solving the equations of a laminar boundary layer. - Journal. adj. mate. and tech. Physics, 1960, No. 3, pp. 111-118.
8. Courant R., Hilbert D. Methods of mathematical physics. Volume I. - M.: Gostekhizdat, 1953.
9. Luke Yu. Special mathematical functions and their approximations. - M.: Mir Publishing House, 1980. - 510 p.
10. Pukhliy V.A. A method for the analytical solution of two-dimensional boundary value problems for systems of elliptic equations. - Journal. will calculate. mate. and Math Physics, 1978, Volume 18, No. 5, pp. 1275-1282.
11. Pukhliy V.A. About one approach to solving boundary value problems of mathematical physics. - Differential Equations, 1979, Volume 15, No. 11. - p. 2039-2043.
12. Pukhliy V.A. Thermoelasticity of working and nozzle blades of gas turbine engines and installations. – 25th International Congress of Theoretical and Applied Mechanics. (ICTAM-2020) – Milano, Italy, 2020.
13. Lantsosh K. Practical methods of applied analysis. - M .: Fizmatgiz, 1961 .-- 524 p

УДК 621.039.548.5

Причины повреждения тепловыделяющей сборки и возможность её ремонта на АЭС

В.В. Шаповаленко[1]

[1]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г.Севастополь, 299053, Россия, [1]shapovalenkovita@rambler.ru

Статья поступила 27.01.2020 г.; после доработки 29.01.2020 г.

Аннотация

Проанализированы основные причины повреждения тепловыделяющих элементов в тепловыделяющей сборке, рассмотрена возможность ремонта тепловыделяющей сборки с учетом её конструкции, определена важность проведения данных работ на АЭС.

Ключевые слова: причины повреждения тепловыделяющего элемента, стенд инспекции и ремонта ТВС, ремонтопригодность ТВС, замена тепловыделяющего элемента в ТВС.

Causes of damage to the fuel Assembly and expediency of its repair at nuclear power plants

V.V. Shapovalenko[1]

Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[1]shapovalenkovita@rambler.ru

Received 27.01.2020 y.; received in final form 29.01.2020 y.

Abstract

The article The main causes of damage to the fuel elements in the fuel Assembly are analyzed, the possibility of repairing the fuel Assembly taking into account its design is considered, and the importance of carrying out these works at the NPP is determined.

Keywords: causes of damage to the fuel element, inspection and repair of the fuel Assembly, repair of the fuel Assembly, replacement of the fuel element

Введение

Одним из направлений повышения топлива использования в ядерной энергетике является повторное использование в тепловыделяющих сборок (ТВС) в активной зоне ядерного реактора после извлечения из них негерметичных тепловыделяющих элементов (твэлов).

Для реализации данной программы был разработан и установлен на АЭС стенд инспекции и ремонта, который позволяет используя, различные методы диагностики оценить целостность конструкции ТВС, а в случае обнаружения дефекта в тепловыделяющем элементе произвести его замену.

Цель и постановка задачи

Проанализировать возможность и важность проведения ремонтных работ тепловыделяющей сборки на территории АЭС. Изучить основные причины повреждения элементов конструкции тепловыделяющей сборки.

Статистика и причины повреждений тепловыделяющих сборок в ядерных реакторах в России.

Как видно из рисунка 1 наибольшее количество негерметичных твэлов в ТВС приходится на ВВЭР-1000.



Рис. 1 Количество негерметичных ТВС при эксплуатации их в реакторах ВВЭР

Как показывает статистика послереакторных исследований отработавших тепловыделяющих сборок, основной причиной их повреждения является: коррозия материала оболочки твэла, отложения продуктов коррозии на её поверхности, фреттинг-износ, взаимодействие топлива и оболочки.

В большинстве ядерных реакторах, работающих на тепловом спектре нейтронов, в качестве материала для оболочки тепловыделяющего элемента используют циркониевый сплав.

При нагревании в ВВЭР водного теплоносителя свыше 400 °С разрушаются пассивирующие защитные оксидные пленки на поверхности тепловыделяющего элемента, после чего напрямую циркониевый сплав начинает взаимодействовать с водой.

Поглощение водорода цирконием из водной среды может явиться причиной изменения механических, коррозионных свойств сплава, характеристик усталости, ползучести, радиационного роста, привести к деформации конструкции тепловыделяющего элемента и его охрупчивании.

Наличие примесей в водном теплоносителе может способствовать образованию отложений на поверхности оболочки твэла и значительным тепловым напряжениям (дебрис-повреждению).

А попадание с потоком теплоносителя частиц и застревание их между поверхностью оболочки твэла и поверхностью ячейки дистанционирующей решетки приводит к повреждению твэла за счет механического воздействия на оболочку, вплоть до образования сквозного отверстия.

Кроме того, способ обжима с усилием периферийных твэлов зубцами дистанционирующей решетки тоже может служить причиной повреждения оболочки твэла.

Реализация разборности тепловыделяющей сборки

В конструкции ТВС-2М, которая в настоящее время является базовой конструкцией тепловыделящей сборки, используемой на АЭС с ВВЭР, возможность её разбора обеспечивается наличием съемной головки ТВС.

Крепление головки тепловыделяющей сборки к направляющим каналам обеспечивается за счет цангового крепления. Применение цангового крепления позволяет проводить монтаж-демонтаж головки с последующей возможной заменой негерметичных твэлов на циркониевые вытеснители.

Цанговое крепление состоит из цанги и стопорного кольца, которые одеваются на направляющие каналы. Цанга имеет четыре фиксирующих элемента, соединенных с упорным буртиком с помощью перемычек, которые деформируются в процессе одевания и снятия цанги.

Разжатие фиксирующих элементов производится до начала установки цанги, что позволяет надеть цангу на направляющий канал без приложения усилий. Сжатие фиксирующих элементов осуществляется при одевании кольца.

Кольцо служит для сжатия фиксирующих элементов после установки цанги и для предотвращения их раскрытия в рабочем положении. Кольцо после установки фиксируется на цанге за счет развальцовки четырех лепестков, расположенных на буртике цанги. Верхняя часть направляющего канала имеет кольцевую проточку, в которую входят фиксирующие элементы цанги после ее закрытия. За счет наличия конусов на проточке в направляющих каналах и на фиксирующих элементах цанги обеспечивается раскрытие цанги для ее демонтажа при снятом кольце.

Однако наконечники твэлов (концевые элементы крепления), которые входят в нижнюю решётку не позволяют легко проводить сборку и разборку. Извлечение твэла из нижней опорной решетки ТВС связано с замятием наконечника из-за прилагаемого усилия.

Для отработки процесса раскрепления твэла в опорной решетке ТВС, корректировки величины усилия, проверки механической стойкости и обоснования отсутствия фреттинг-износа тепловыделяющих элементов и дистанционирующих решеток ТВС, на площадке экспериментально исследовательской базы АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС» был разработан специализированный стенд, на котором была доказана возмож-

ность извлечения твэла, в том числе и негерметичного, без его разрушения путем предварительного проталкивания, а затем вытягивания из ячейки решетки с усилием не более 200 Н.

Такое раскрепление позволит обеспечить возможность извлечения и замены негерметичных твэлов в случае их появления на вытеснители непосредственно на АЭС на стенде инспекции и ремонта.

Важность проведения ремонта ТВС на площадке АЭС

Поскольку ТВС является разборной конструкцией, имеет смысл использовать эту возможность для проведения ремонта ТВС в случае обнаружения дефекта конструкции, либо повреждения тепловыделяющего элемента. Проведение данных работ особенно будет актуально на этапе усовершенствования конструкции ТВС и опробации её в реальных условиях эксплуатации АЭС.

Из-за технических недоработок конструкции, либо на этапе модернизации или отработки отдельных элементов конструкции, либо в процессе эксплуатации в тепловыделяющей сборке могут проявиться недостатки её конструкции.

Поиск новых материалов в качестве оболочки твэла, оптимизация технологии изготовления ядерного топлива, поисковые работы, связанные с оптимизацией химического состава ядерного топлива, взаимная работа материала оболочки твэла в сочетании с новым ядерным топливом на этапе отработки конструкции тепловыделяющего элемента и проверки его работы в реальных условиях эксплуатации в активной зоне реактора, могут явиться причиной повреждения твэла.

Кроме того, отрабатывается технология создания топливной таблетки для реакторов ВВЭР из уран-эрбиевого топлива, диоксида урана повышенного обогащения, уран-гадолиниевого топлива с разным содержанием в нём поглотителя, топливная таблетка из мох-топлива, с вариациями по глубине выгорания ядерного топлива.

При опробации данного топлива при длительной эксплуатации его в активной зоне реактора, могут быть обнаружены дефекты, которые не были обнаружены на этапе разработки. Поэтому стоит рассмотреть возможность замены отдельного дефектного твэла в составе экспериментальной ТВС, исследования причины повреждения, замены поврежденного элемента на вытеснитель и дальнейшего исследования работы ТВС, это сократит время научно-изыскательных работ на оптимизацию конструкции ТВС и поиск новых решений.

Установка предназначена не только для ремонта ТВС, но и её инспекции. В связи с этим её использование также актуально еще и потому, что период между перегрузками ТВС увеличивается с 12 месяцев до 24 месяцев. Стремление уменьшить потери энерговыработки АЭС за счет увеличения времени между перегрузками ТВС приводит к увеличению периода невыявления поврежденной ТВС, что может привести к усилению дефекта повреждения. Стенд инспекции позволит выявить дефекты ТВС на ранней стадии.

Однако существуют значительные риски в проведении таких работ. Повреждения ТВС могут носить исключительный, индивидуальный характер, что создает трудности в написании методики проведения ремонтных работ. Не под каждый случай повреждения ТВС, можно написать и провести ремонтные работы без риска полного или частичного повреждения твэла или отдельных элементов ТВС.

Кроме того, в процессе вытягивания из ячейки твэла можно деформировать близлежащие ячейки дистанционирующей решетки с целыми твэлами, что в дальнейшем в процессе эксплуатации ТВС может проявиться и стать причиной повреждения. Надо также учитывать дополнительные затраты времени на проведение ремонтных работ ТВС, сложность проведения работ с учетом дефекта ТВС и риски связанные с этим.

А также то, что в будущем планируется эксплуатация на ВВЭР регенерированного топлива, которое имеет значительный радиационный фон, при котором ремонтные работы возможны исключительно дистанционно и при реализации автоматизации процесса.

Экономическая выгода от внедрения операции ремонта ТВС на площадке АЭС заключается в следующем.

Если суммировать затраты на обращение с ТВС, имеющей дефекты конструкции, то можно отметить, что затраты на исключение из активной зоны ТВС с дефектными твэлами, проведение их замены на вытеснители и возврат ТВС на дожигание топлива в активную зону реактора, обойдутся гораздо дешевле по сравнению с суммарными затратами на исключение недовыженной ТВС из эксплуатации, транспортировка её на предприятие к месту хранения (Горно-химический комбинат), затраты на обеспечение хранения ТВС на предприятии, если такое возможно с

учетом типа её дефекта, затраты на переработку, создание нового топлива, транспортировку и эксплуатацию на АЭС.

Заключение

Работы по созданию стенда инспекции и ремонта ТВС велись давно, имеется и опыт проведения данных работ на ядерных реакторах PWR.

На площадках АЭС с реакторами ВВЭР лишь планируется поставка стендов, но до её внедрения необходимо решить ряд очень важных вопросов и самый главный из них - это обеспечение безопасности проведения работ, определение перечня повреждений элементов ТВС, при которых возможен ремонт ТВС, отработка технологии проведения ремонта для каждого случая, снижение времени инспекции, более простой и более быстрый монтаж и демонтаж оборудования в бассейне выдержки, снижения рисков увеличения длительности проведения планово предупредительного ремонта, связанных с работами, выполняемыми на стенде инспекции ТВС, повышения безопасности выполнения работ, обоснование экономической составляющей.

Список литературы

1. Перепелкин С.О. Изучение состояния и возможности извлечения негерметичных ТВЭЛОВ из ремонтопригодных ТВС ВВЭР-1000 : Дисс ... канд. техн. наук Димитровград, 2010.- 126 с.
2. Васильченко И. Н., Кушманов С. А., Акимов В. В., Бромирский И. А. Разработка и модернизация СИР ТВС для ВВЭР1000: Годовой отчет ОКБ «Гидропресс». 2010. - с. 69–72.
3. Новиков В. В. Развитие конструкций и материалов твэлов для ВВЭР // Конференция НТК-2014 «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направления развития». М., 12–13 ноября 2014 г.
4. Долгов А.Б., Черников О.Г. Стратегия движения к нулевому отказу ядерного топлива // X международная научно-техническая конференция МНТК-2016 «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». М., 25-27 мая 2016 г.

References

1. Perepelkin S. O. Studying the state and possibility of extracting leaky fuel RODS from maintainable VVER-1000 fuel assemblies: Diss ... Cand. Techn. Dimitrovgrad, 2010.- 126 p.
2. Vasilchenko I. N., Kushmanov S. A., Akimov V. V., Bromirsky I. A. Development and modernization OF SER TVs for VVER1000: Annual report of OKB "Gidropress". 2010. - pp. 69-72.
3. Novikov V. V. Development of fuel rod structures and materials for VVER / / NTC-2014 Conference " new generation Nuclear fuel for nuclear power plants. The results of development, operating experience and development prospects". Moscow, November 12-13, 2014
4. Dolgov A. B., Chernikov O. G. Strategy for zero-failure of nuclear fuel / / X international scientific and technical conference MNTC-2016 "Safety, efficiency and Economics of nuclear energy". Moscow, may 25-27, 2016

УДК 621.039.54

Каким быть ядерному топливу в новых проектах ВВЭР?

В.В. Шаповаленко[1], К.Б.Матузаев[2] , К.П. Аникевич[3]
[1]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33 г.Севастополь, 299053, Россия, [1]shapovalenkovita@rambler.ru, [2]matuzaev@mail.ru, [3]anikonst@mail.ru

Статья поступила 21.02.2020 г. ; после доработки 25.02.2020 г.

Аннотация

Рассмотрены достоинства и недостатки разрабатываемого и эксплуатируемого ядерного топлива на АЭС с реакторами ВВЭР в реализации задачи повышения топливоиспользования безопасной эксплуатации ядерной энергетической установкой.

Ключевые слова: мох-топливо, REMIKC-топливо, уран-эрбиевое топливо, уран-гадолиниевое топливо, основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих элементов в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов.

What nuclear fuel will be used in VVER nuclear reactors?

V.V. Shapovalenko[1] K.B.Matuzaev [2] , K.P.Anikevich[3]
Sevastopol stat university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[1]shapovalenkovita@rambler.ru, [2]matuzaev@mail.ru, [3]anikonst@mail.ru

Received 21.02.2020 y.; received in final form 25.02.2020 y.

Abstract

Advantages and disadvantages of developed and operated nuclear fuel at nuclear power plants with VVER reactors when performing the task. Increasing the use of nuclear fuel and improving the safe operation of a nuclear power plant.

Keywords: MOX-fuel, REMIKC-fuel, uranium-erbium fuel, uranium-gadolinium fuel, basic requirements for substantiating the strength and thermomechanical behavior of fuel elements in the core of water-water power reactors.

Введение

Какое бы ядерное топливо ни разрабатывалось для ядерных реакторов, оно должно выполнять следующие задачи: обеспечивать работоспособность твэлов и ТВС в течение срока службы ТВС до проектных значений выгорания топлива, а его эксплуатация должна способствовать снижению себестоимости получаемой электроэнергии.

С этой целью прорабатываются: различный состав ядерного топлива, технология изготовления топливной таблетки, проводятся исследования её теплофизических характеристик при работе в различных режимах эксплуатации.

Проектирование тепловыделяющих элементов для ВВЭР регламентируется нормативными документами:

1.Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к тепловыделяющим элементам и тепловыделяющим сборкам с уран-плутониевым (МОКС) топливом для атомных станций» (НП-080-07 с изменениями январь 2008 г.), где устанавливаются основные требования безопасности, реализуемые при проектировании и изготовлении тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок с оксидным таблетированным уран-плутониевым (МОКС) топливом для атомных станций с реакторами типа ВВЭР и БН При

проектировании твэлов и ТВС с МОКС-топливом должны учитываться характеристики РУ, обеспечиваться совместимость твэлов и ТВС с МОКС-топливом с элементами АЗ, РУ, другими системами АС, предназначенными для обращения с топливом, учитываться требования федеральных норм и правил в области использования атомной энергии к системам хранения и транспортирования необлученного и отработавшего ядерного топлива. Выгорание топлива не должно превышать установленных в проекте предельных значений. Конструкция твэлов и ТВС с МОКС-топливом в течение назначенного срока службы должна исключать возможность деформаций, вызывающих недопустимое ухудшение теплосъема с поверхности твэлов. Конструкция и исполнение АЗ и ее элементов, включая твэлы и ТВС с МОКС-топливом, должны быть такими, чтобы при нормальной эксплуатации и при нарушениях нормальной эксплуатации, включая проектные аварии, не превышались соответствующие пределы повреждения твэлов. Конструкция твэлов и ТВС с МОКС-топливом должна быть работоспособной, надежной и безопасной в течение назначенного срока службы.[1]

2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих элементов в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов» НП-094-15, согласно которым конструкционные материалы, используемые для изготовления твэлов и ТВС, должны обладать радиационной и химической стойкостью в теплоносителе реакторов в течение всего срока службы твэлов и ТВС; физико-механические характеристики материалов твэлов и ТВС должны быть обеспечены во всех режимах нормальной эксплуатации, нарушения нормальной эксплуатации и проектной аварии в температурном диапазоне с учетом анизотропии свойств материалов (при ее наличии) и влияния облучения. Принятые при проектировании твэлов решения должны соответствовать критериям безопасности.[2]

Цель и постановка задачи

Обзор характеристик ядерного топлива для водо-водяных реакторов под давлением, направлений развития ядерного топлива для реализации нижеперечисленных задач.

Ядерное топливо для реализации задачи удлинения топливной кампании

Усовершенствование реакторов в настоящее время идет в направлении удлинения кампании реактора, что позволяет уменьшить затраты энергии на собственные нужды, уменьшить частоту выгрузки отработавшего топлива, увеличить глубину выгорания ядерного топлива.

Высокая длительность кампании реактора достигается путем повышения начального обогащения топлива и введением в его состав поглощающих материалов способных выгорать, например, гадолиний, эрбий.

Кроме того, использование выгорающих поглотителей дает целый ряд очевидных преимуществ: сведения к минимуму числа подвижных поглощающих стержней; увеличение первоначальной загрузки топлива в активную зону реактора, которая требуется для увеличения длительности кампании, без увеличения начального запаса реактивности; выравнивание распределения энерговыделения по объему реактора; возможности регулирования температурного коэффициента реактивности, увеличение выгорания топлива.

Однако увеличение глубины выгорания топлива приводит к неравномерности выгорания ядерного топлива по высоте, что ослабляет прочностные характеристики тепловыделяющего элемента и в случае аварийных ситуаций может привести к его разрушению; увеличивается мощность остаточных тепловыделений от отработавших ТВС.

При переходе к более длительному периоду кампании реактора возникает необходимость увеличения содержания поглотителя в топливе, что приводит к снижению его теплопроводности и росту теплонапряженности твэла, что может привести к локальному подкипанию теплоносителя на поверхности оболочки твэла.

К этому следует добавить, что достижение топливного цикла до 24 месяцев возможно только при повышенных значениях обогащения ядерного топлива по изотопу ^{235}U свыше 5%. Из этого следует, что реализация требований безопасности при использовании циркониевого сплава Э-110 в качестве оболочки тепловыделяющего элемента сложно выполнима, в связи с этим рассматривается возможность, как вариант, использовать хромо - никелевую сталь 42ХНМ, которая имеет более высокие прочностные характеристики, чем циркониевый сплав, а для исключения развитого кипения на поверхности

твэла, использовать в составе ТВС-2М перемешивающие решетки «Вихрь» и Прогонка», которые за счет турбулизатора создают завихряющее движение потока теплоносителя вдоль твэла, отбрасывают образовавшиеся на поверхности оболочки твэла пузырьки пара в ядро потока теплоносителя, где они конденсируются.

Однако использование в качестве материала оболочки твэла хром-никелевого сплава 42ХНМ имеет как положительные, так отрицательные стороны.

К достоинствам 42ХНМ можно отнести: низкую скорость окисления в водяном паре, высокую температуру плавления, наличие опыта эксплуатации таких оболочек в элементах конструкции ПЭЛ ОР СУЗ ВВЭР и транспортных реакторах.

Из недостатков сплава можно отметить: повышенный, по сравнению с циркониевой оболочкой, захват тепловых нейтронов (Cr-3,05 барн; Ni-4,49 барн; Mo-2,48 барн), что потребует повышения обогащения топлива, снижение пластичности при высокой температуре, изменение химического состава и, следовательно, свойств под облучением, наработка короткоживущих радиоактивных изотопов хрома, радиоактивного кобальта и молибдена.

Также в качестве материала для оболочки твэла рассматривается циркониевый сплав Э-110 с напылением хрома (5, 10 и 15 мкм).

Его положительные свойства: скорость окисления хромированных твэлов при температуре 1100-1200 °С на порядок меньше скорости окисления циркониевых труб, после автоклавных экспериментов по окислению в водяном паре при давлении 18 МПа и температуре 1100-1200 °С сохраняются механические свойства оболочек (отсутствует водородное охрупчивание) в отличие от циркониевых оболочек. Внедрение в производство требует минимальных изменений в существующей конструкции и технологии изготовления твэлов. Является антидебризным покрытием. Обеспечивает коррозионную стойкость в условиях повышения мощности и наличия кипения.

Из главных недостатков можно отметить отсутствие достаточной экспериментальной базы по состоянию покрытия при облучении. Сечение захвата тепловых нейтронов изотопами хрома (3,05 барн) в 15 раз выше, чем у изотопов циркония (0,185барн). Наработка активного короткоживущего изотопа ^{51}Cr (T1/2=28 дней) и изменение химического состава в результате накопления ванадия.

Ядерное топливо для реализации повышенной безопасности в случае аварии

К ядерному топливу, повышенной безопасности предъявляются требования:

- низкая наработка водорода при аварии;
- снижение пиковых температур при аварии,
- высокая коррозионная стойкость при рабочих параметрах, в том числе в условиях кипения теплоносителя,
- отсутствие поглощения водорода при нормальной эксплуатации, минимальное влияние на обогащение топлива и физику реактора, повышение сопротивления дебризному повреждению.

К ядерному топливу, повышенной безопасности можно отнести уран-эрбиевое топливо. Существенным отличием эрбиевого поглотителя является то, что при повышении температуры теплоносителя спектр нейтронов сдвигается в сторону более высокой энергии, при этом поток нейтронов, приходящийся на область резонанса, увеличивается и, следовательно, увеличивается и поглощение нейтронов (рис.1). Таким образом, использование эрбия в качестве выгорающего поглотителя позволяет улучшить температурный коэффициент реактивности замедлителя.[3]

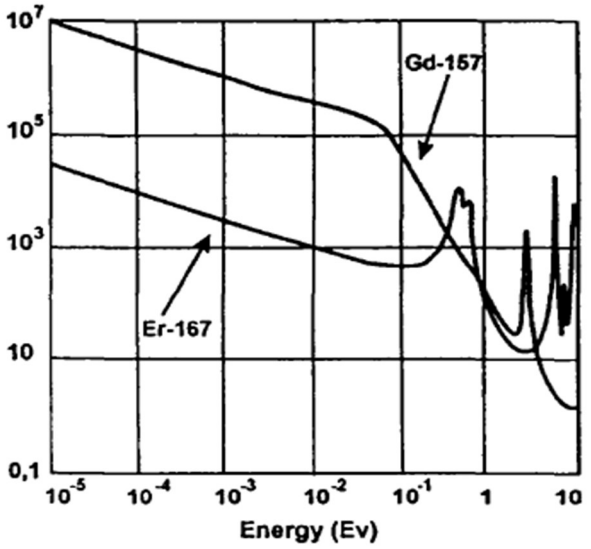


Рис. 1 Зависимость сечения поглощения гадолиния и эрбия от энергии нейтронов

У эрбия сечение поглощения тепловых нейтронов на два порядка ниже, чем у гадолиния, до энергий 0.1 эВ. При энергиях нейтронов свыше 0.1 эВ сечение поглощения эрбия начинает расти, а сечение гадолиния продолжает па-

дать с ещё большей скоростью. Значения сечений сравниваются при энергии нейтронов около 0.4 эВ. Таким образом, если по каким-либо причинам энергия нейтронов начинает расти (например, увеличение энерговыделения в активной зоне реактора и, как следствие, разогрев замедлителя и снижение его плотности), таким образом эрбий может выступать в роли отрицательной обратной связи: с увеличением энергии нейтронов их поглощение эрбием возрастает, и энерговыделение в активной зоне снижается. [3]

К недостаткам эрбиевого поглотителя следует отнести некоторое сокращение кампании, связанное с недовыгоранием эрбия в конце кампании. Впрочем, этот недостаток может быть скомпенсирован увеличением обогащения топлива. Следует отметить, что при применении эрбия в качестве выгорающего поглотителя в 18–24-месячных циклах с повышенным обогащением наблюдается увеличение стояночной концентрации борной кислоты до значений порядка 20–21 г/кг (в случае использования только урангадолиниевых выгорающих поглотителей значение составляет порядка 16 –17 г/кг).

Ядерное топливо для реализации задачи минимизации радиоактивных отходов

РЕМИКС-топливо изготавливается из неразделенной смеси урана и плутония, выделенных из отработанного ядерного топлива в ходе переработки с добавлением обогащенного урана с содержанием ^{235}U около 16-17%. [4]

В МОХ-топливе регенерат плутония смешивается с обедненным ураном, при этом весовое содержание плутония составляет 8-10%. В РЕМИКС-топливе весовое содержание плутония не превышает 3.5%.

Поскольку технология создания РЕМИКС-топлива отличаются от МОХ-топлива это напрямую отражается на количественном и качественном составе отработанного топлива и возможности повторного использования данного топлива в активной зоне реактора.

Главным достоинством РЕМИКС-топлива является возможность его многократного использования в активной зоне реактора без существенной деградации.

При создании МОХ-топлива используется обедненный уран с существенно большим добавлением плутония, чем у РЕМИКС-топлива, что не дает возможности многократного использования в тепловых реакторах.

Относительно загрузки РЕМИКС-топлива в активную зону ВВЭР-1000. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реактора ВВЭР-1000 позволяют осуществить полную загрузку активной зоны, что же касается МОХ-топлива, то речь идет о возможности 30% загрузки ядерного топлива в активную зону ВВЭР-1000.

Однако не все так радужно с эксплуатацией в активной зоне ВВЭР регенированного топлива. В процессе эксплуатации образуется из изотопа ^{235}U путем радиационного захвата нейтрона изотоп ^{236}U, который делится только быстрыми нейтронами.

К тому же многократное использование регенерированного топлива приводит к значительному росту ^{236}U, что снижает реактивность реактора, происходит снижение доли делящихся изотопов плутония (^{239}Pu и ^{241}Pu) и возрастание доли неделящихся изотопов плутония (^{240}Pu и ^{242}Pu). [4]

После каждого рецикла количество ^{236}U увеличивается, соответственно это приводит к росту ^{232}U, так если на начало цикла ^{236}U – 4.8 , ^{232}U – $2\cdot10^{-6}$, то концу пятого цикла содержание по изотопам ^{236}U – 19.6 , а изотопа ^{232}U – $1\cdot10^{-5}$.

Кроме того, чем длиннее кампания между перезагрузками, тем больше нарабатывается ^{236}U, что требует большего обогащения ядерного топлива по ^{235}U. Так, при кампании 510 эффективных суток и 67 ТВС подпитки при содержании ^{236}U 0,55% понадобится максимальное обогащение 5,2%, а при содержании ^{236}U 1,0% - обогащение 5,37%.

Также отмечается значительное влияние на радиационную обстановку наличие в свежем топливе ^{232}U, ^{242}Pu. Чем больше период от момента изготовления ТВС до момента её загрузки в активную зону, тем выше мощность эквивалентной дозы от свежего топлива.

Если сравнивать дозовые нагрузки то мощность дозы ионизирующего излучения от поверхности ТВС от свежего топлива диоксида урана составляет 5мкЗв/ч, а от регенерированного необлученного РЕМИКС-топлива - 65 мкЗв/ч. [4]

К этому добавляется еще один негативный фактор - после каждого рецикла увеличивается содержание америция и кюрия, что негативно отражается на качественном составе при длительном хранении отработанного топлива и возможности дальнейшей его переработки.

Однако, несмотря на некоторое ухудшение состава, отмечается, что эффективное обогащение отработавшего топлива на конец пятого

цикла значительно превосходит эффективное обогащение природного урана, что свидетельствует о возможности дальнейшего рециклирования. Если на начало кампании обогащение ^{235}U составляло 4.95%, то на конец пятого цикла содержание его в регенерированном топливе составляет 2.06%, что гораздо выше содержания природного урана 0.72%.

РЕМИКС-топливо как и МОХ-топливо имеет общий недостаток - необходимость обеспечения повышенной радиационной безопасности.

Кроме того, при использовании данного топлива значительно вырастут затраты на его изготовление, транспортировку, хранение, переработку и утилизацию высокорадиоактивных отходов, образуемых в процессе создания регенерированного топлива.

Общим положительным качеством отмечается экономия природных ресурсов в связи с повторным использованием отработавшего топлива и вовлечением его в работу реакторной установки.

Ядерное топливо для работы в реакторе ВВЭР-С со спектральным регулированием

Управление реактором за счет изменения водно-уранового соотношения путем введения в активную зону подвижных вытеснителей. В качестве вытеснителей используются тепловыделяющие элементы с обедненным ураном, закрепленные на циркониевом прутке. Основная идея спектрального регулирования основывается на регулировании водно-уранового соотношения - ужесточении спектра нейтронов в начале компании реактора с целью увеличения накопления плутония и последующего смягчения спектра в активной зоне к концу компании для дожигания делящегося материала. Диапазон изменения водо-уранового отношения в ТВС при опущенных и извлеченных вытеснителях меняется от (1.40-1,60) до (1.95-2,15). [5] Применение системы спектрального регулирования имеет целый ряд преимуществ: экономия природного урана, замыкание ядерного топливного цикла, спектральное управление позволяет загрузить в легководный реактор активную зону, полностью состоящую из МОКС-топлива.

Заключение

Дальнейшее развитие ядерной энергетики связано с повышением топливоиспользования. С этой целью разрабатывается технология создания регенирированного топлива, многократное использование которого в активной зоне реактора позволит сэкономить расходы на добычу природного урана, задействовать огромное количество отработанного топлива и тем самым снизить темп его накопления, что в итоге позволит повысить экономическую эффективность использования ядерного топлива.

На сегодняшний день в активную зону реактора ВВЭР-1000 энергоблока №3 Балаковской АЭС в режиме трехгодичного топливного цикла с периодом перегрузки в 18 месяцев загружено и успешно эксплуатируется три ТВС-2М с шестью тепловыделяющими элементами с РЕМИКС-топливом.

Если результаты эксперимента подтвердят возможность длительной безопасной эксплуатации АЭС с загрузкой в неё регенерированного топлива, то замыкание ядерного топливного цикла с включением в него реакторов ВВЭР и БН станет вполне реализуемой задачей.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к тепловыделяющим элементам и тепловыделяющим сборкам с уран-плутониевым (МОКС) топливом для атомных станций» (НП-080-07)
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные требования к обоснованию прочности и термомеханического поведения тепловыделяющих элементов в активной зоне водо-водяных энергетических реакторов» (НП-094-15)
3. Аль Давахра Сааду Использование выгорающих поглотителей в реакторах типа ВВЭР [Текст] Дис….канд.техн.наук: 05.14.03/ Аль Давахра Сааду ; МИФИ.- М. 2006.- 143с.
4. Постоварова Д.В. Радиационные характеристики РЕМИКС-топлива при многократном рецикле в реакторах ВВЭР-1000 / Д.В.Постоварова, Н.В.Ковалев, М.С.Онегин, Б.А.Бибичев // Известия вузов. Ядерная энергетика. № 1, 2016.
5. Васильченко И.Н., Махин В.М., Васильченко Р.И. и др., расчетно-конструкторские проработки активных зон ВВЭР со спектральным регулированием, материалы МНТК, 2013г, ОАО ОКБ «Гидропресс», г. Подольск, Россия.

References

1. Federal rules and regulations on the use of nuclear energy "Basic requirements for fuel elements and fuel assemblies with uranium-plutonium (MOX) fuel for nuclear power plants" (NP-080-07)

2. Federal rules and regulations on the use of nuclear energy "Basic requirements for substantiating the strength and thermomechanical behavior of heat-generating elements in the core of water-powered power reactors" (NP-094-15)
3. Al Davaxra Saada Use you-garaudy absorbers in VVER-type reactors [Text] Dis....Cand.Techn.Sciences: 05.14.03/ al Zawahra sa ; MIFI.- M. 2006.- 143c.
4. Postovarova D. V. Radiation characteristics of RE-MIX fuel at multi-fold recycling in VVER-1000 reactors / D. V. Postovarova, N. V. Kovalev, M. S. Onegin, B. A. Bibichev / / Izvestiya vuzov. Nuclear power. No. 1, 2016.
5. Vasilchenko I. N., Makhin V. M., Vasil-Chenko R. I. and others, design studies of VVER active zones with spec-tral regulation, materials of the MNTC, 2013, JSC OKB Gidropress, Podolsk, Russia.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ ПРОЦЕССЫ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК (681.518.5:519.718):(621.311.25:005.591.6)

Оценка надежности систем диагностирования АСУ ТП АЭС и методы её повышения

Кузнецова Н.И.[1], Баканов Д.В. [2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия., [1]nika100452@gmail.com, [2]denisfromcrimea@yandex.ru

Статья поступила 17.01.2020 г.; после доработки 22.01.2020 г.

Аннотация

Статья посвящена исследованию структурной надежности систем диагностирования АСУ ТП АЭС. В настоящий момент на предприятиях атомной промышленности широко применяются системы диагностирования АСУ ТП. Технические комплексы систем автоматизации характеризуются количественными показателями надежности. Системы диагностирования АСУ ТП АЭС играют важнейшую роль в эксплуатации энергоблоков, а именно поиск и определение причин возникновения оказав оборудования автоматизации. В работе выполнен расчет количественных показателей структурной надежности и сравнительный анализ двух систем диагностирования по вероятности безотказной работы. Предлагается решение задачи повышение надежности систем диагностирования, и внедрение современного оборудования взамен морально-устаревшего.

Ключевые слова: автоматизация, система диагностирования, УКТС, ТПТС, надежность, АСУ ТП АЭС.

Evaluation of reliability of NPP APCS diagnostics systems and methods of its enhancement

N.I. Kuznetsova [1], D.V. Bakanov [2]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, [1]nika100452@gmail.com, [2]denisfromcrimea@yandex.ru

Received 17.01.2020 y.; received in final form 22.01.2020 y.

Abstract

The article is devoted to the study of structural reliability of the NPP APCS diagnostics systems. At present, I & C diagnostics systems are widely used in nuclear industry enterprises. Technical complexes of automation systems are characterized by quantitative indicators of reliability. The NPP APCS diagnostics systems play the most important role in the operation of power units, namely the search and determination of the causes of automation equipment. The work carried out calculation of quantitative indicators of structural reliability and comparative analysis of two diagnostics systems on probability of failure-free operation. It is proposed to solve the problem of improving the reliability of diagnostic systems, and to introduce modern equipment instead of morally obsolete equipment.

Keywords: Automation, diagnostics system, UKTS, TPTS, reliability, NPP APCS.

Введение

АСУ ТП АЭС представляет собой сложную систему с множеством подсистем, позволяющая управлять ЯЭУ с наименьшим вмешательством эксплуатирующего персонала. Такая система безусловно нуждается в самодиагностике, чтобы вероятность возникновения нарушений работоспособности технологического оборудования была сведена к минимуму. В процессе эволюции АСУ ТП АЭС можно выделить такие комплексы

средств автоматизации, реализующие функции АСУ ТП:

- унифицированный комплекс технических средств (УКТС);
- типовые программно-технические средства (ТПТС-НТ).

Оба комплекса на данный момент имеют широкое применение на АЭС в разных странах мира, реализуя различного вида функции для обеспечения автоматизации технологического процесса. УКТС - это комплекс средств автоматизации старого образца, поэтому является морально устаревшим. ТПТС в свою очередь, представляет современную систему автоматизации.

Обе системы в своем составе имеют функцию самодиагностики, что позволяет незамедлительно зафиксировать отказы оборудования автоматики определить место и причину их возникновения.

В составе УКТС имеется блок системного контроля БСК 1–ДПИ, а в структуре ТПТС присутствует модуль контроля ТПТС 55.1674.

Замена морально-устаревших комплексов УКТС на современные ТПТС со встроенной функцией самодиагностики, дает возможность повысить уровень безопасности АЭС, так и обеспечить высокую точность обнаружения причинно-следственных связей отказов оборудования автоматизации АЭС.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Сравнительный анализ систем диагностирования для УКТС и ТПТС не производился и в литературе не освещен.

Так как вышеперечисленные системы диагностирования обеспечивают надежный контроль и безопасность эксплуатации средств АСУ ТП, поэтому они сами должны иметь высокие показатели надежности.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Таким образом, целью статьи является анализ систем контроля работоспособности и диагностирования для комплексов УКТС и ТПТС, путем расчета структурной надежности элементов систем, а также внедрение оптимальных методов ее повышения.

Результатом полученных расчетов будет являться, сравнительный анализ полученных характеристик вероятности безотказной работы систем диагностирования УКТС и ТПТС с применением оптимального метода повышения надежности.

Изложение основного материала исследования

Назначение систем диагностирования.

Рассмотрим первую систему УКТС, в которой блок БСК1 - ДПИ предназначен для:

1. Приема диагностической информации блоков унифицированного комплекса технических средств помехоустойчивого исполнения со встроенной функцией диагностики УКТС-ДПИ:
   - блоков аналого-дискретных преобразователей помехоустойчивого исполнения со встроенной функцией диагностики АДП-ДПИ;
   - блоков распределения унифицированного токового сигнала помехоустойчивого исполнения со встроенной функцией диагностики БГРТ-ДПИ;
   - блоков питания помехоустойчивого исполнения со встроенной функцией диагностики БП-ДПИ;
   - преобразователей измерительных помехоустойчивого исполнения со встроенной функцией диагностики Ш1-ДПИ.
2. Передачи диагностической информации во внешнюю систему сбора и обработки;
3. Отображения состояния диагностируемых устройств.

Аналогично рассмотрим систему ТПТС-НТ, в которой модуль контроля ТПТС 55.1674 предназначен для управления лампами и сбора диагностических сигналов от модулей ТПТС, имеющих самодиагностику, формирует сигналы состояния модулей и передает в общую систему сбора информации.

Для анализа структурной надежности на рис.1 и рис.2 предствленны принципиальные схемы функционирования блока БСК1 –ДПИ и модуля контроля ТПТС 55.1674.

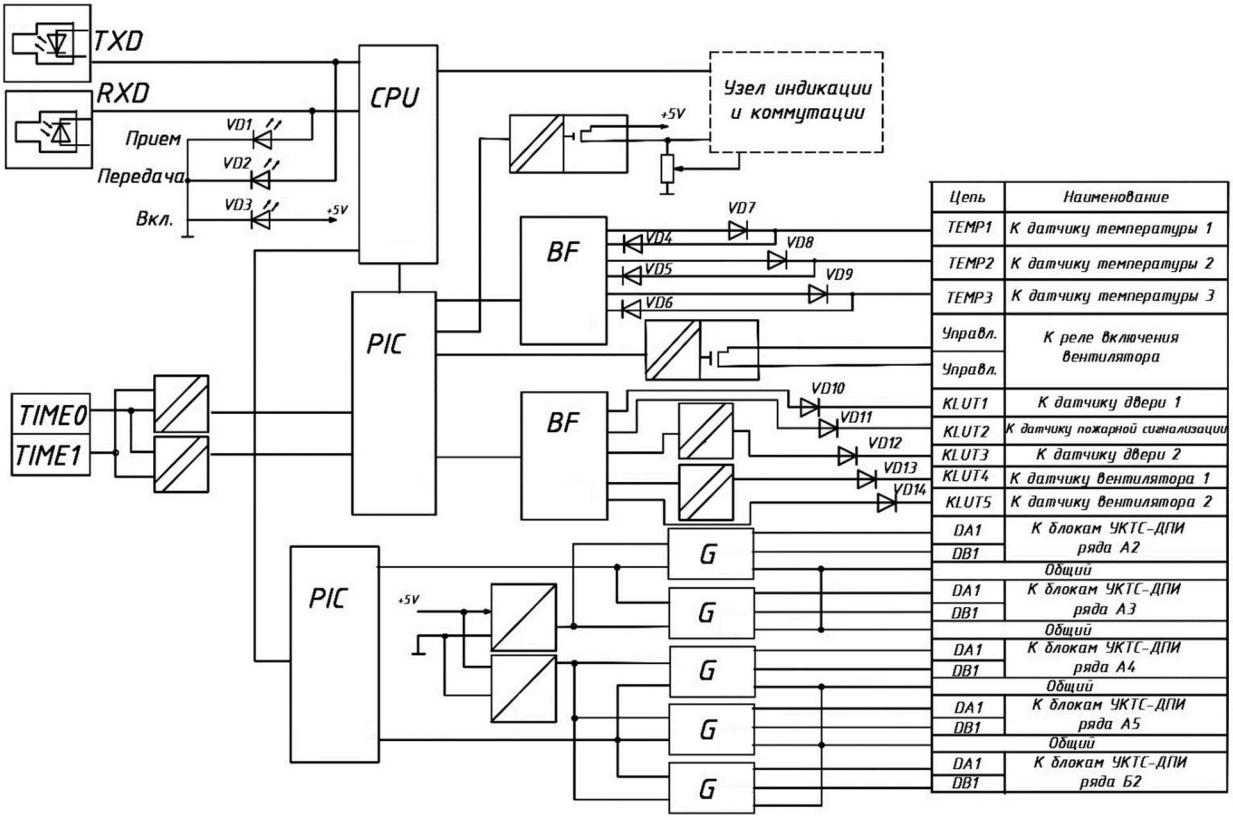


Рис. 1 Принципиальная схема блока системного контроля УКТС БСК 1-ДПИ

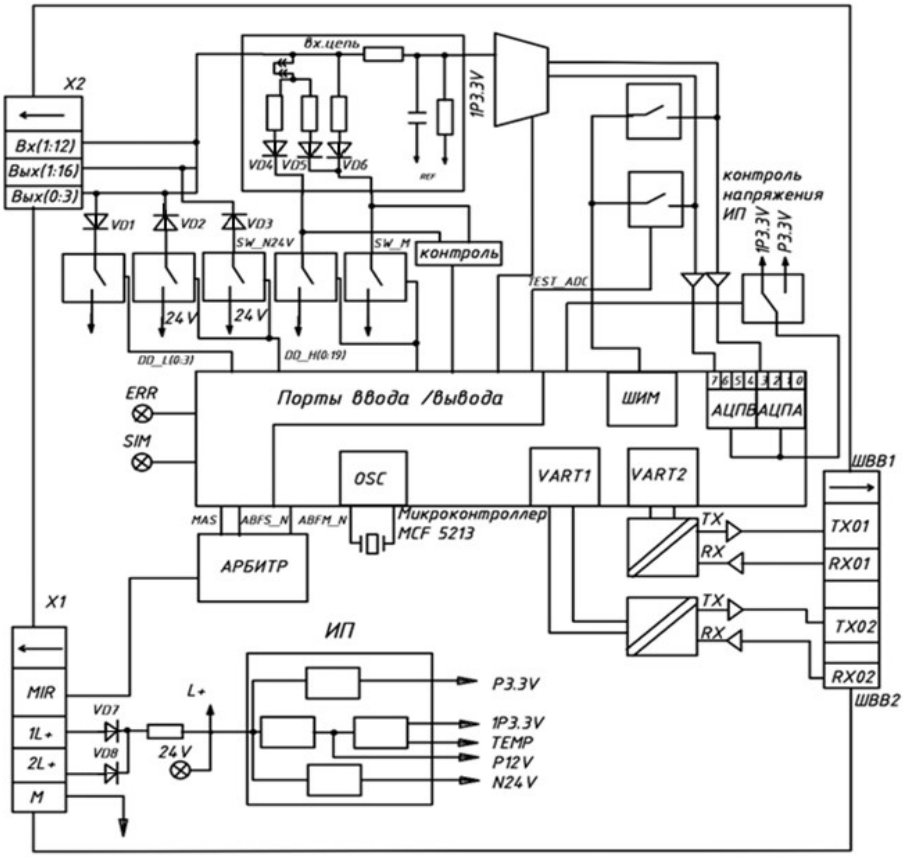


Рис. 2 Принципиальная схема модуля контроля ТПТС 55. 1674

Принципиальные схемы систем диагностирования преобразовали в структурные схемы для расчета количественных показателей надежности, которые представлены на рис.3.

Для расчета надежности применили экспоненциальный закон распределения:

$$P_i = e^{-\lambda_i t},$$

где: P_i – вероятность безотказной работы i-го элемента λ_i – интенсивность отказа i-го элемента; t – время работы системы.

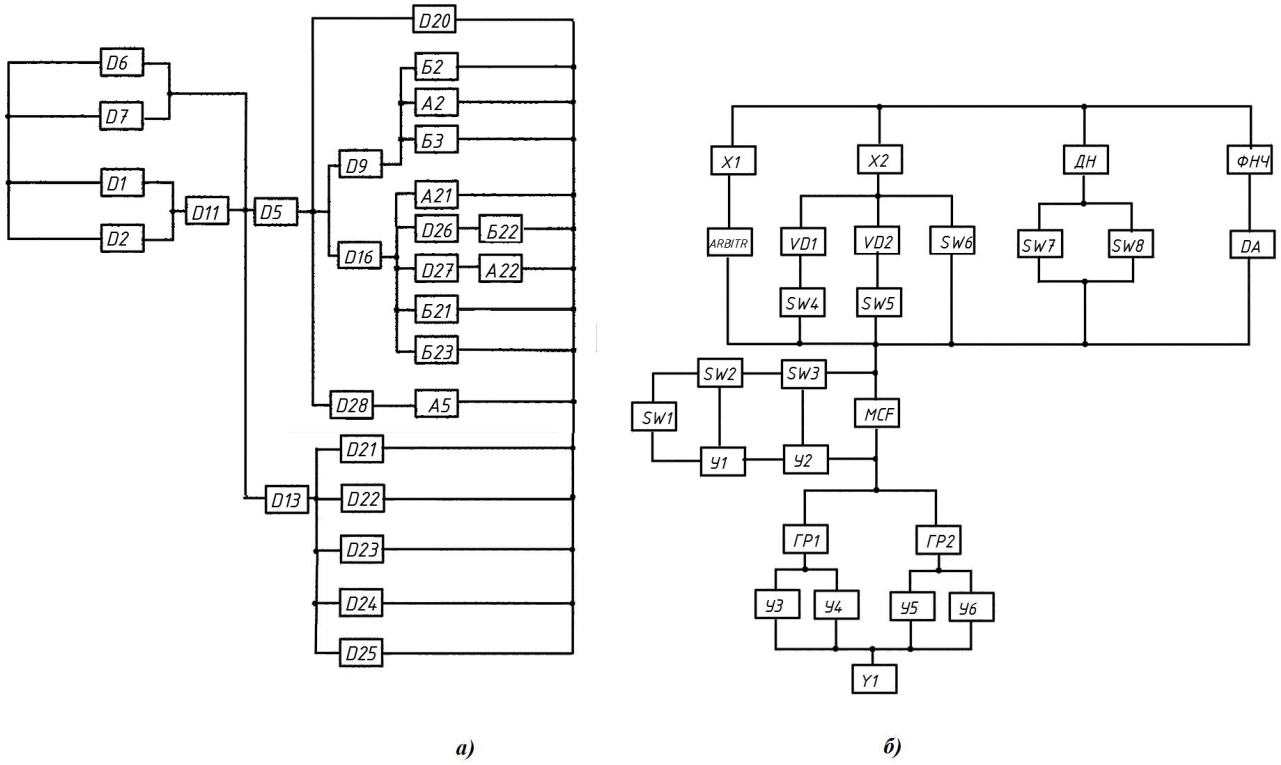


Рис. 3 Структурные схемы для расчета надежности: *а)* блок системного контроля УКТС БСК 1-ДПИ, *б*) модуль контроля ТПТС 55.1674.

Расчет производим для времени 300000 ч. и для получения наглядных характеристик разобьем на равные интервалы времени. Интенсивности отказов λ выбраны из технической документации для каждого элемента в отдельности. В процессе расчета используем известные аналитические зависимости для последовательного формула (1) и параллельного формула (2) соединения элементов:

$$P_C = \prod_{i=1}^{n} P_i(t) \quad (1)$$

$$P_C = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - P_i(t)) \quad (2)$$

Расчеты структурной надежности технических систем произведены с в таблицах 1 и 2.

Таблица 1. *Расчет вероятности безотказной работы блока системного контроля УКТС БСК 1-ДПИ*

P(t)	λ,1/ч	t, ч					
		50000	100000	150000	200000	250000	300000
1	2	3	4	5	6	7	8
P_{D1}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498
P_{D2}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498
P_{D20}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498
P_{D28}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498
P_{D21}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8
P_{D22}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498
P_{D23}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498
P_{D24}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498
P_{D25}	10^{-5}	0,6065	0,3679	0,2231	0,1353	0,0821	0,0498
P_{D9}	$3{,}2\cdot10^{-6}$	0,8513	0,7247	0,6169	0,5252	0,4471	0,3806
P_{D16}	$3{,}2\cdot10^{-6}$	0,8513	0,7247	0,6169	0,5252	0,4471	0,3806
P_{D5}	$5{,}7\cdot10^{-6}$	0,7516	0,565	0,4246	0,3192	0,2399	0,1803
P_{D13}	$5{,}7\cdot10^{-6}$	0,7516	0,565	0,4246	0,3192	0,2399	0,1803
P_{D6}	$7{,}7\cdot10^{-6}$	0,6808	0,4635	0,3155	0,2148	0,1462	0,0996
P_{D7}	$7{,}7\cdot10^{-6}$	0,6808	0,4635	0,3155	0,2148	0,1462	0,0996
P_{D26}	$7{,}7\cdot10^{-6}$	0,6808	0,4635	0,3155	0,2148	0,1462	0,0996
P_{D27}	$7{,}7\cdot10^{-6}$	0,6808	0,4635	0,3155	0,2148	0,1462	0,0996
P_{D11}	$4\cdot10^{-5}$	0,1353	0,0183	0,0025	0,0003	$5\cdot10^{-5}$	$6\cdot10^{-6}$
$P_{Б2}$	$1{,}7\cdot10^{-5}$	0,436	0,1901	0,0829	0,0362	0,0158	0,0069
P_{A2}	$1{,}7\cdot10^{-5}$	0,436	0,1901	0,0829	0,0362	0,0158	0,0069
$P_{Б3}$	$1{,}7\cdot10^{-5}$	0,436	0,1901	0,0829	0,0362	0,0158	0,0069
P_{A1}	$1{,}7\cdot10^{-5}$	0,436	0,1901	0,0829	0,0362	0,0158	0,0069
$P_{Б21}$	$6{,}7\cdot10^{-7}$	0,9672	0,9356	0,9049	0,8753	0,8466	0,8189
$P_{Б22}$	$6{,}7\cdot10^{-7}$	0,9672	0,9356	0,9049	0,8753	0,8466	0,8189
P_{A5}	$1{,}5\cdot10^{-6}$	0,9259	0,8573	0,7937	0,7349	0,6805	0,63
P_{A22}	$1{,}1\cdot10^{-5}$	0,5655	0,3198	0,1809	0,1023	0,0578	0,0327
$P_{Б23}$	$1{,}1\cdot10^{-5}$	0,5655	0,3198	0,1809	0,1023	0,0578	0,0327
Pc	-	0,8513	0,547	0,2771	0,115	0,0418	0,0141
$PD_{21\text{-}25'}$	-	0,8452	0,6004	0,3965	0,2524	0,1574	0,0971
Pc'	-	0,8530	0,5659	0,3132	0,145	0,0577	0,0207

***Таблица 2**. Расчет вероятности безотказной работы модуля контроля ТПТС 55.1674*

P(t)	λ,1/ч	t,ч					
		50000	100000	150000	200000	250000	300000
P_{X1}	10^{-6}	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408
P_{X2}	10^{-6}	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408
P_{arbitr}	10^{-5}	0,6065	0,3678	0,223	0,1353	0,0820	0,0497
$P_{VD1,VD2}$	$5\cdot10^{-6}$	0,7788	0,6065	0,4723	0,3678	0,2865	0,223
$P_{ФНЧ}$	$8{,}69\cdot10^{-7}$	0,9574	0,9167	0,8777	0,8403	0,8046	0,7703
$P_{SW1\text{-}SW8}$	$6{,}66\cdot10^{-6}$	0,7165	0,5134	0,3678	0,2635	0,1888	0,1353
$P_{ГР1,ГР2}$	10^{-6}	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408
P_{Y1}	10^{-6}	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408
$P_{У1\text{-}У6}$	10^{-6}	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408
P_{DA}	10^{-5}	0,6065	0,3678	0,2231	0,1353	0,0820	0,0497
P_{MFC}	10^{-5}	0,6065	0,3678	0,2231	0,1353	0,0820	0,0497
$P_{ДН}$	10^{-6}	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408
Pc	-	0,9364	0,7963	0,5915	0,3932	0,2429	0,1436
P_{Arbitr}'	-	0,8451	0,6004	0,3964	0,2523	0,1574	0,0970
P_{MCF}'	-	0,8451	0,6004	0,3964	0,2523	0,1574	0,0970
P_{DA}'	-	0,8451	0,6004	0,3964	0,2523	0,1574	0,0970
Pc'	-	0,9441	0,8357	0,6509	0,4462	0,2786	0,1642

Для повышения надежности систем произведено структурное резервирование, для БСК 1-ДПИ и параллельно добавлены к элементам $D_{21\text{-}25}$ идентичные по надежности. Аналогичные манипуляции произведены для элементов MCF, DA, Arbitr, входящих в модуль контроля ТПТС 55.1674. Результаты расчетов для зарезервированных систем представлены в таблицах с пометкой Pc', а структурные схемы с применением методов повышения надежности представлены

на рис. 4. Выполнен сравнительный анализ, результатом которого является график зависимости вероятности безотказной работы от времени эксплуатации, который приведен на рис. 5.

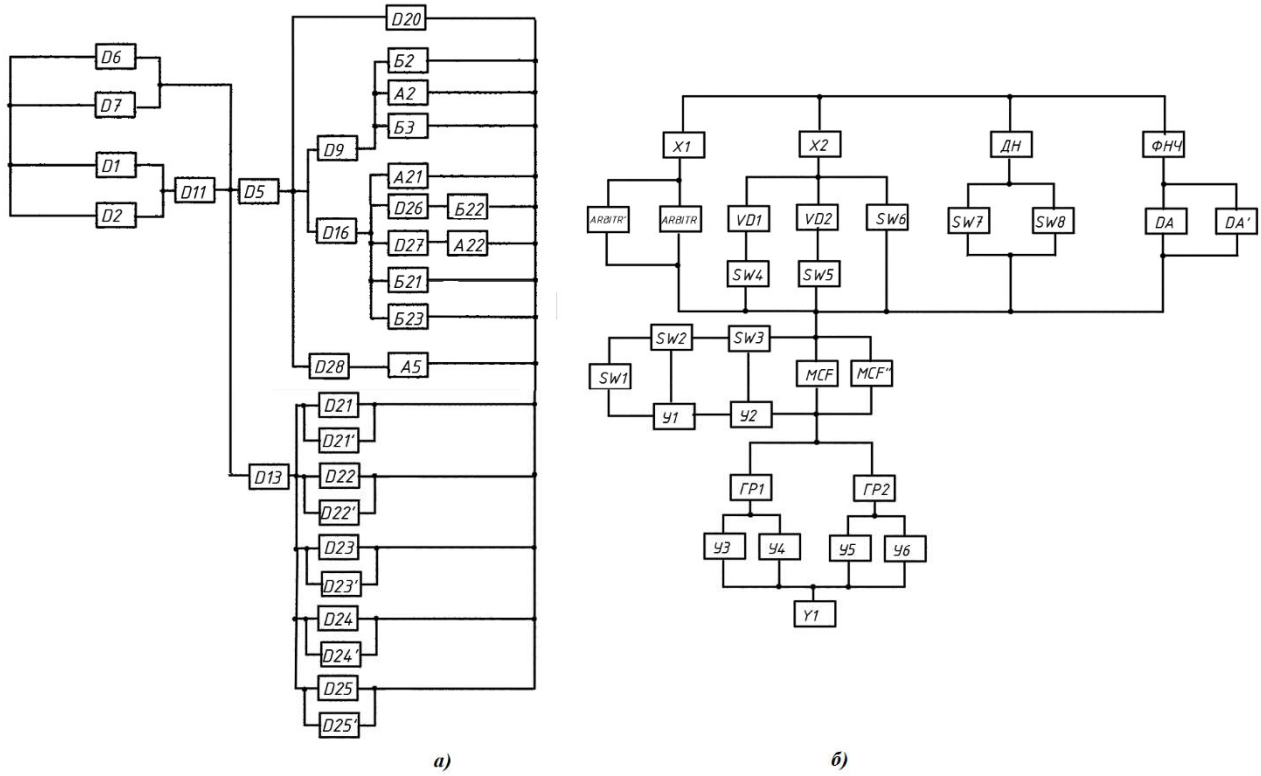


Рис. 4 Структурные схемы для расчета надежности с применением структурного резервирования: *а)* блок системного контроля УКТС БСК 1-ДПИ, *б*) модуль контроля ТПТС 55.1674

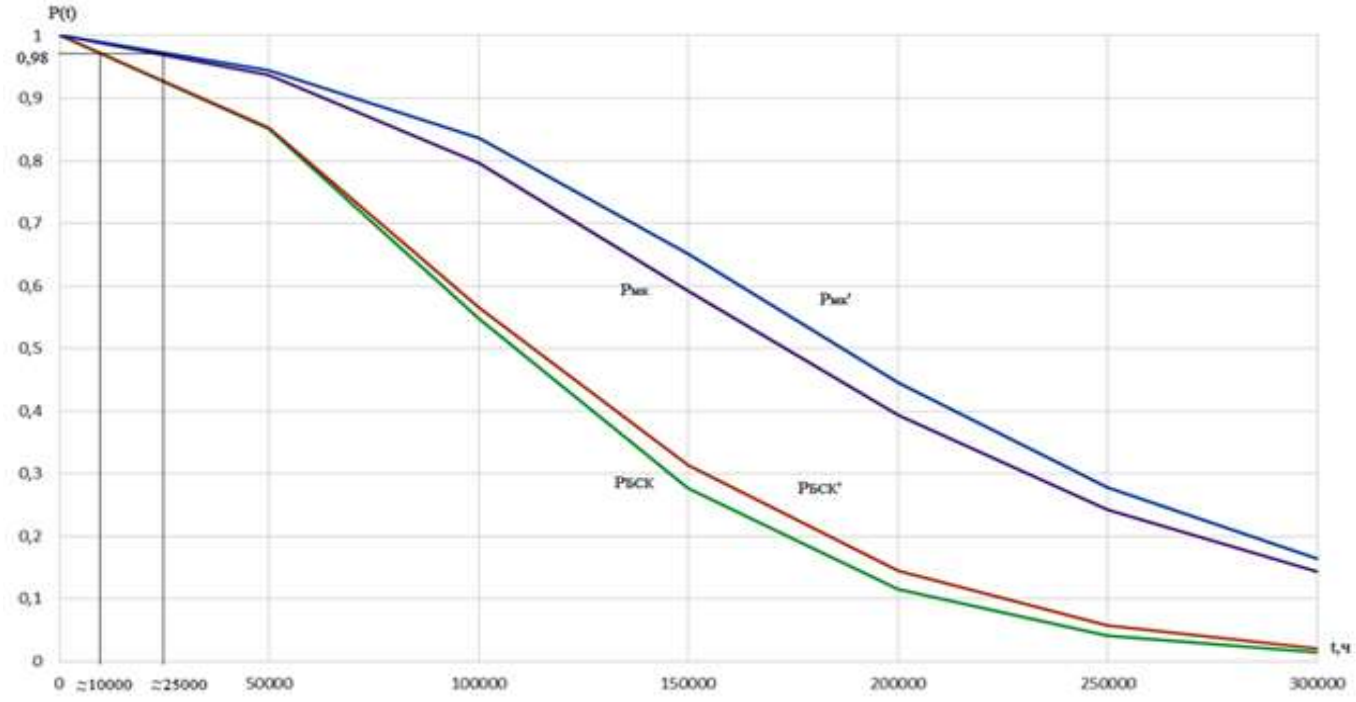


Рис. 5 Результат сравнительного анализа надежности блока БСК1-ДПИ и модуля контроля ТПТС 55.1674

Выводы из этого исследования

Исходя из графика зависимости вероятности безотказной работы от времени эксплуатации P(t), который представлен на рис.5, можно сделать ряд выводов:

- вероятность безотказной работы модуля контроля ТПТС значительно превышает вероятность безотказной работы блока БСК1-ДПИ в интервале [0…300000ч.], это обуславливается качеством и повышенной надежностью современного оборудования, что приводит к меньшему количеству отказов и нарушений работоспособного состояния оборудования АСУ ТП АЭС;
- при достижении времени 50000 ч., вероятность безотказной работы обоих систем начинает стремительно падать, это обуславливается старением элементов, которое присуще каждой из систем;
- реализация методов повышения надежности (резервирование) показала, что характеристики модуля контроля ТПТС значительно превышают характеристики блока системного контроля БСК1-ДПИ, при условии применения аналогичных методов повышения надежности для двух систем;
- при достижении вероятности безотказной работы P(t)=0,98, соответствующему ГОСТу 27.002-2015. «Межгосударственный стандарт. Надежность в технике», модуль контроля ТПТС имеет среднее время наработки $T_{ср}$≈25000 ч., что значительно превышает время планово предупредительного ремонта $T_{ППР}$=13140 ч. и, тем самым подчеркивает высокие показатели безопасности и надежности. Блок БСК1-ДПИ при достижении вероятности безотказной работы P(t)=0,98 имеет среднее время наработки $T_{ср}$≈10000 ч.,

Дальнейшие перспективы в этом направлении

Рекомендуем на всех этапах жизненного цикла изделия проводить сравнительный анализ и своевременно производить модернизацию оборудования систем автоматизации.

Список литературы

1. Аникевич К.П. Унифицированный комплекс технических средств: учебн. пособие. / К.П. Аникевич. - Севастополь : СИЯЭ и П, 2001. - 128 с.
2. ГОСТ 27.002-89 «Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения» ИУС 12-2016.
3. Модули ТПТС-55. Общие технические условия ТПТС 55.1000 ТУ.
4. Н.И. Кузнецова, Н.В. Серова-Нашева. Расчет и анализ эксплуатационной надежности АСУ ТП АЭС и методы ее повышения: учеб. пособие для выполнения курсового проекта./ Н.И. Кузнецова, Н.В. Серова-Нашева - Севастополь: СевГУ,2016-116 с.:ил.
5. Руководство по эксплуатации блока системного контроля БСК1-ДПИ:. 468213.001
6. Интенсивности отказов элементов для электронных схем. [Электронный ресурс] Режим доступа: http://www.alldatasheet.com
7. Баканов Д.В. выпускная квалификационная работа на тему «Автоматизация энергоблока АЭС. Анализ алгоритмов и программа тестирования при диагностировании АСУ ТП АЭС» СевГУ, ИЯЭиП, 2020.

References

1. Anikevich K.P. Unifitsirovannyy kompleks tekhnicheskikh sredstv [Unified hardware].: tutorial K.P. Anikevich. - Sevastopol: SIYAEiP, 2001 - 128p.
2. GOST 27.002-89 «Nadezhnost' v tekhnike. Osnovnyye ponyatiya. Terminy i opredeleniya» [Reliability in technology. Basic concepts. Terms and Definitions ,: IUS -12-2016.
3. Moduli TPTS-55. Obshchiye tekhnicheskiye usloviya TPTS 55.1000 [Modules TPTS-55. General specifications TPTS 55.1000] TS.
4. N.I. Kuznetsova, N.V. Serova-Nasheva Raschet i analiz ekspluatatsionnoy nadezhnosti ASU TP AES i metody yeye povysheniya: [Calculation and analysis of the operational reliability of the automated process control system of NPPs and methods for its improvement: textbook. coursework] tutorial for coursework. / N.I. Kuznetsova, N.V. Serova-Nasheva – Sevastopol: SevGU, 2016 -116p.;ill.
5. Rukovodstvo po ekspluatatsii bloka sistemnogo kontrolya BSK1-DPI [Operation manual for the system control unit BSK1-DPI].: 468213.001
6. Intensivnosti otkazov elementov dlya elek-tronnykh skhem [Component failure rates for electric-throne circuits] Available at: http://www.alldatasheet.com
7. Bakanov D.V. vypusknaya kvalifikatsionnaya rabota na temu «Avtomatizatsiya energobloka AES. Analiz algoritmov i programma testiro-vaniya pri diagnostirovanii ASU TP AES» [Bakanov D.V. final qualifying work on the theme "Automation of a nuclear power unit. Analysis of algorithms and test program for the diagnosis of automated process control systems of NPP"]

УДК 621.01

Разработка системы исследований поведения механических образцов с использованием компьютера

Скрябина Е.В.[1],Корнеева Н.К.[2], Пичугова Л.Н.[3], Моисеев Д.В.[4], Михайлова О.С.[5]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, skryabina ev@mail.ru, korneeva_nk@mail.ru , kebpf2015@mail.ru , dmitriymoiseev@mail.ru , r_o_c_86@mail.ru

Статья поступила 10.02.2020 г.; после доработки 12.02.2020 г.

Аннотация

Рассмотрена задача создания системы исследования поведения механических образцов, находящихся под нагрузкой с использованием современных информационно-измерительных технологий и создана программная система исследования поведения механических образцов на растяжение и сжатие, который выполняет построение диаграмм с отображением на экран числовых значений параметров испытуемого образца, а также, его прочностные характеристики.

Ключевые слова: поведения механических образцов под нагрузкой, расчет по разрушающим нагрузкам.

Development of a system for investigating the behavior of mechanical samples using

Skryabina E.V.[1],Korneeva, N.K.[2], Pichugova, L.N.[3], Moiseev D.V.[4], Mikhajlova O.S.[5]

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. skryabina ev@mail.ru, korneeva_nk@mail.ru, kebpf2015@mail.ru [4], dmitriymoiseev@mail.ru [5] 03, r_o_c_86@mail.ru

Received 10.02.2020 y ; received in final form 12.02.2020 y.

Abstract

The problem of creating a system study the behavior of mechanical samples under load with the use of modern information-measuring technologies and developed a software system for the investigation of mechanical behavior of specimens in tension and compression which builds a chart displaying on the screen a numeric parameter values of test sample and also, its strength characteristics

Keywords: the mechanical behavior of the samples under load, the calculation of the breaking load.

Введение

Проблема прочности, износостойкости и надежности машин, механизмов и других технических систем входит в первую пятерку приоритетов современного научно-технического прогресса.

Современная теория дислокаций в кристаллах позволяет качественно объяснить поведение твердых тел в различных условиях нагружения. В частности, деформируемое твердое тело необходимо описывать как многоуровневую самосогласующуюся систему [1].

Проведение каких-либо исследований, связанных с поведением механических систем при эксплуатации без применения компьютерных систем сегодня немыслимо и дает преимущество в решении проблем, связанных с наукоемкими отраслями.

Постановка задачи

Задачей выполненной работы было создание системы исследования поведения механических образцов, находящихся под нагрузкой с использованием современных информационно-измерительных технологий и возможность изучения прочностных характеристик материалов в лабораторных условиях с применением персонального компьютера

Такая система должна обеспечивать анализ состояния исследуемого образца, отображать основные механические характеристики, исходные и текущие параметры.

Решение задачи

При проектировании специализированной компьютерной системы были задействованы: разрывная машина ЦДМ-10, датчики линейного расширения, аналого-цифровой преобразователь (АЦП), компьютер с поддержкой шины USB версии 2.0

При использовании АЦП посредством компьютера необходимо инициализировать устройства для определенного режима работы, выделить адресное пространство в оперативной памяти компьютера и считать данные. Для решения этих проблем используется драйвер. Для обеспечения взаимодействия последнего с программой обработки и анализа, разработано программное обеспечение (ПО), которое играет роль моста, задавая установке режимы работы АЦП, установку частот дискретизации и пересылку данных в файловый поток, для последующего изъятия и обработки. Структурная схема системы изображена на рисунке 1.

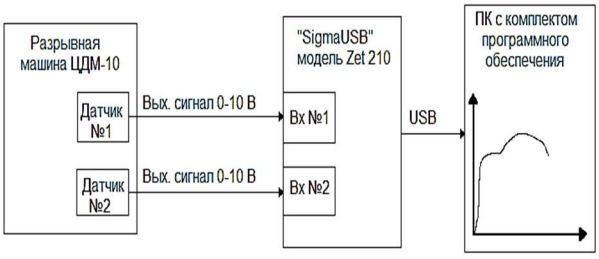


Рис. 1 Структурная схема атоматизированной информационно-измерительной системы

При рассмотрении, реальный объект, освобожденный от несущественных особенностей, носит название расчетной схемы.

Построение расчетной схемы начинается со схематизации структуры и свойств материала. Общепринято рассматривать все материалы как сплошную среду, независимо от особенностей молекулярного строения вещества.

Такое упрощение совершенно естественно, поскольку размеры рассматриваемых в сопротивлении материалов объектов несопоставимо больше характерных размеров межатомных расстояний. Схема сплошной среды позволяет использовать анализ бесконечно малых. Она весьма универсальна и принимается как основополагающая не только в сопротивлении материалов, но и в теории упругости, пластичности, в гидро- и газодинамике.

Сплошная среда при выборе расчетной схемы наделяется свойствами, отвечающими основным свойствам реального материала. Так, например, под действием внешних сил реальное тело меняет свои геометрические размеры. После снятия внешних сил геометрические размеры тела полностью или частично восстанавливаются.

При выборе расчетной схемы вводятся упрощения и в геометрию реального объекта. Основным упрощающим приемом в сопротивлении материалов является приведение геометрической формы тела к схеме стержня. Многие сложные конструкции могут рассматриваться состоящими из элементов, имеющих форму стержня.

В результате расчета нужно получить ответ на вопрос: удовлетворяет или нет конструкция тем требованиям надежности, которые к ней предъявляются.

На основании анализа конструкции выявляется та точка в теле, где возникают наибольшие напряжения. Найденное значение напряжений в этой точке сопоставляется с предельным значением для данного материала. Из сопоставления найденных расчетных напряжений и предельных напряжений делается заключение о прочности конструкции.

Также может использоваться метод расчета по разрушающим нагрузкам.

Напряжение материалов возникает соответственно, при нагружении конструкции в виде растяжения или сжатия.

Сжатие отличается от растяжения формально только знаком силы N. При растяжении нормальная сила N направлена от сечения, а при сжатии - к сечению. Таким образом, при анализе внутренних сил сохраняется единство подхода к вопросам растяжения и сжатия.

Для однородного стержня внутренние силы распределены по сечению равномерно.

Тогда, согласно формулы (1), нормальное напряжение для всех точек сечения будет одним и тем же:

$$\sigma = \frac{N}{A}, \qquad (1)$$

где А — площадь поперечного сечения.

Поскольку, у нагруженного стержня напряженное состояние является однородным и все участки растянутого стержня находятся в одинаковых условиях, согласно формуле (2) деформация ε по оси стержня остается одной и той же, равной своему среднему значению по длине l.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \qquad (2)$$

Эта величина называется относительным удлинением стержня.

Из формулы (3) видно, что в пределах малых удлинений для подавляющего большинства материалов справедлив закон Гука, который устанавливает прямую пропорциональность между напряжениями и деформациями:

$$\sigma = E * \varepsilon \qquad (3)$$

Величина E представляет собой коэффициент пропорциональности, называемый модулем упругости первого рода. Модуль упругости является физической константой материала и определяется экспериментально [2].

Испытание на растяжение и сжатие производится на специальных машинах, где усилие создается либо при помощи груза, действующего на образец через систему рычагов, либо при помощи гидравлического давления, передаваемого на поршень.

Основной задачей испытания на растяжение и сжатие является построение диаграмм растяжения или сжатия, т. е. зависимости между силой, действующей на образец, и его удлинением.

Рассмотрим основные особенности диаграммы растяжения.

На рисунке 2 показана типичная для углеродистой стали диаграмма испытания образца в координатах $P = f(\triangle l)$.

Полученная кривая условно может быть разделена на следующие четыре зоны.

Зона ОА носит название зоны упругости. Здесь материал подчиняется закону Гука и этот участок кривой для большей наглядности показан с отступлением от масштаба.

Удлинения Δl на участке ОА очень малы, и прямая ОА, будучи вычерченной в масштабе истинных удлинений, совпала бы в пределах толщины линии с осью ординат.

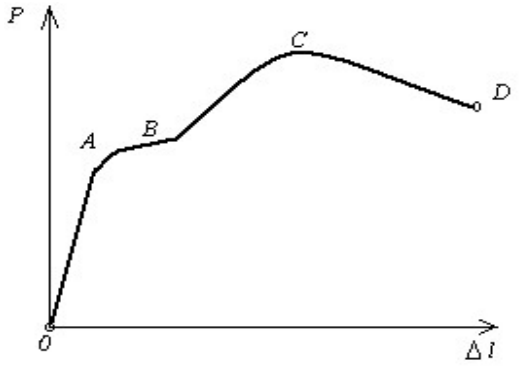


Рис.2 Диаграмма растяжения.

Величина силы, до которой остается справедливым закон Гука, зависит от размеров образца и физических свойств материала.

Зона АВ называется зоной общей текучести, а участок АВ диаграммы - площадкой текучести. Здесь происходит существенное изменение длины образца без заметного увеличения нагрузки. Наличие площадки текучести АВ для металлов не является характерным. В большинстве случаев при испытании на растяжение и сжатие площадка АВ не обнаруживается, и диаграмма растяжения образца имеет вид кривых, показанных на рисунке 3.

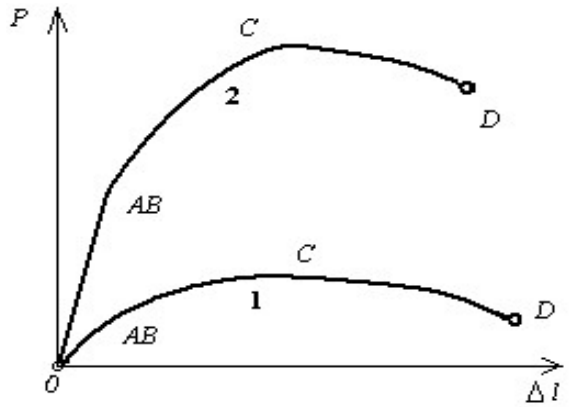


Рис.3 Диаграмма растяжения с отсутствующей площадкой текучести

Кривая 1 типична для алюминия и отожженной меди, кривая 2 - для высококачественных легированных сталей.

Зона ВС называется зоной упрочнения. Здесь удлинение образца сопровождается возрастанием нагрузки, по неизмеримо более медленным (в сотни раз), чем на упругом участке. В стадии упрочнения на образце намечается место будущего разрыва и начинает образовываться так называемая шейка - местное сужение образца

По мере растяжения образца утонение шейки прогрессирует. Когда относительное

уменьшение площади сечения сравняется с относительным возрастанием напряжения, сила P достигнет максимума (точка C).

В дальнейшем удлинение образца происходит с уменьшением силы, хотя среднее напряжение в поперечном сечении шейки и возрастает. Удлинение образца носит в этом случае местный характер, и поэтому участок кривой CD называется зоной местной текучести. Точка D соответствует разрушению образца.

Если испытуемый образец, не доводя до разрушения, разгрузить (точка K на рисунке 4), то в процессе разгрузки зависимость между силой P и удлинением Δl изобразится прямой KL (рисунок 4).

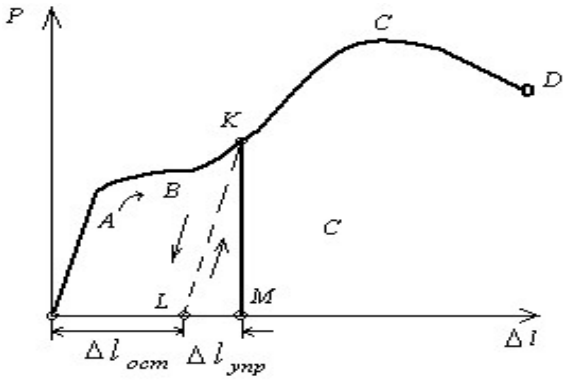


Рис. 4 Образование остаточной деформации.

Опыт показывает, что эта прямая параллельна прямой OA. При разгрузке удлинение полностью не исчезает. Оно уменьшается на величину упругой части удлинения (отрезок LM). Отрезок OL представляет собой остаточное удлинение.

Его называют также пластическим удлинением, а соответствующую ему деформацию - пластической деформацией.

Если образец был нагружен в пределах участка OA и затем разгружен, то удлинение будет чисто упругим, и остаточная деформация будет отсутствовать.

Чтобы дать количественную оценку описанным выше свойствам материала, перестроим диаграмму растяжения

$P = f(\triangle l)$ в координатах σ и ε.

Так как эти величины постоянны, то диаграмма $\sigma = f(\varepsilon)$ (рисунок 5) имеет тот же вид, что и диаграмма растяжения, но будет характеризовать уже не свойства образца, а свойства материала.

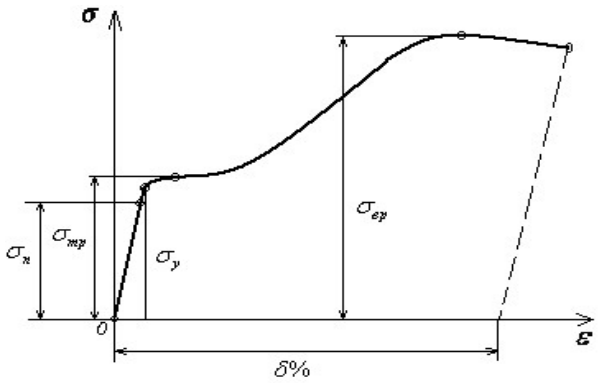


Рис. 5 Основные механические характеристики

Для обеспечения работы системы и анализа результатов создано программное обеспечение, которое в полной мере отражает характер и цель проводимых испытаний. Интерфейс программы обслуживания разрывной машины достаточно прост для понимания. До начала испытаний в программу должны быть внесены начальные значения испытуемого изделия (размеры по длине и ширине).

В ходе исследования пользователь может наблюдать изменения параметров образца таких как: текущая длина, относительное удлинение, нагрузка на образец. Все изменения фиксируются графически на диаграмме растяжения, изменение которой происходит динамически с отображением на ней основных механических характеристик (предела пропорциональности, упругости, текучести, прочности).

В ходе выполнения эксперимента все пункты меню заблокированы для предотвращения потери данных и ввода некорректных данных. Внешний вид программы представлен на рисунке 5.

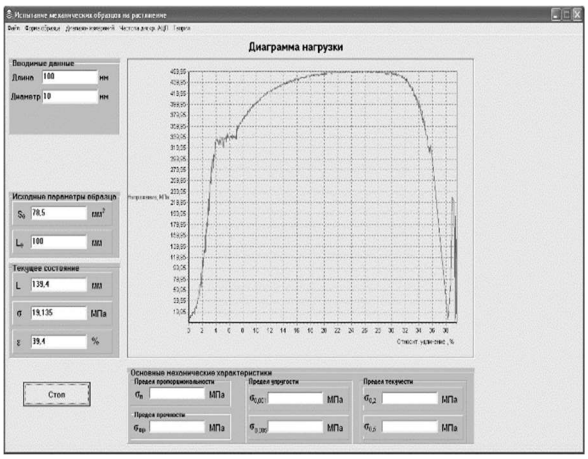


Рис. 5 Интерфейс системы исследований.

В программе можно осуществлять установку необходимой частоты дискретизации АЦП. По умолчанию частота дискретизации равна значению 25кГц.

В результате экспериментов, выполненных с помощью системы исследования наглядно отражены результаты и получены параметры испытаний образца.

Заключение

В процессе разработки предложенного комплекса, была создана программная система исследования поведения механических образцов на растяжение и сжатие. Продукт выполняет построение диаграмм растяжения и сжатия с отображением на экран числовых значений параметров испытуемого образца, а также, его прочностные характеристики. Данная система значительно поможет проводить испытания на прочность важных конструктивных элементов механизмов, несущих статическую и динамическую нагрузки.

Список литературы

1. Москвитин В.В. Циклическое нагружение элементов конструкций. М.: Наука. 1988 г.– 344 с
2. Тюмис Ю.М., Азматов Х.Х. Математическое моделирование технического деформирования. Известия МГТУ «МАМИ» №2 (12), 2011,195-201 с.

References

1. V.V. Moskvitin, Cyclic loading of structural elements. Moscow: Nauka. 1988– from 344 c.
2. Temis Yu.M., Akhmetov Kh.Kh. Mathematical modeling of technical deformation. Izvestiya MGTU "MAMI" №2 (12), 2011, 195-201 c

УДК 621.311.42

Цифровые подстанции – важный элемент интеллектуальной энергосистемы

О.Н. Титаренко[1] И.А. Муртазаев[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
г. Севастополь, 299015, Россия, [1]plotnykova198608@mail.ru , [2]foreducation99@mail.ru.

Статья поступила 30.01.2020 г.; после доработки 31.01.2020 г.

Аннотация

В статье рассмотрены перспективы полномасштабного использования инновационных цифровых технологий на подстанциях. Приведен анализ основных характеристик традиционной и цифровой подстанции. Рассмотрены достоинства и недостатки внедрения и полного перехода подстанции на цифровые технологии.

Ключевые слова: электротехника, электроэффективность, цифровые подстанции, цифровые технологии.

Digital substations are an important element of the smart grid

O.N. Titarenko[1], I. A. Murtazayev[2]
Federal state autonomous establishment of higher education «Sevastopol State University» Sevastopol, 299015, Russia,
[1]plotnykova198608@mail.ru, [2]foreducation99@mail.ru.

Received 30.01.2020 y. ; received in final form 31.01.2020 y.

Abstract

The article deals with the prospects of full-scale use of innovative digital technologies at substations. The analysis of the main characteristics of traditional and digital substations is given. Advantages and disadvantages of substation implementation and complete transition to digital technologies are considered.

Keywords: electrical engineering, electrical efficiency, digital substations, digital technologies.

Введение

Цифровые технологии производства систем управления вышли из стадии научных исследований и экспериментов и перешли в стадию практического использования. Разработаны и внедрены инновационные коммуникационные шаблоны обмена информацией. Цифровые технологии более экономичны при проектировании, монтаже, наладке и в эксплуатации. Из-за многофункциональности этих технологий появляется возможность быстрого расширения и модернизации системы даже в процессе эксплуатации.

Произошло существенное развитие аппаратных и программных средств систем управления. Вследствие обновления международных стандартов и развития современных информационных технологий открывается возможность инновационных подходов к решению задач автоматизации и управления энергообъектами, позволяя создать подстанцию нового типа — цифровую подстанцию (ЦПС).

В 2017 году на Петербургском международном экономическом форуме президент Владимир Путин призвал сформировать принципиально новую, гибкую нормативную базу для внедрения цифровых технологий во все сферы жизни. Указанное касается и сферы электроэнергетики. На сегодня со стороны компании ПАО «Россети» сформирована концепция «Цифровая трансформация 2030». Таким образом, главной задачей есть рассмотрение возможности применения современных цифровых технологий не

только на цифровых подстанциях высокого напряжения (220 В и выше), но и на подстанциях более низкого напряжения (<110 В).

Цифровая подстанция - это электроподстанция, которая оснащена информационно-технологическими и управляющими системами, в которой информационный обмен данных между элементами подстанции происходит не в аналоговом, а в цифровом формате (цифровыми информационными потоками).

Разница между традиционной и цифровой подстанцией

Различия между традиционной и цифровой подстанцией следующие.

Для традиционной подстанции различные виды оборудования и материалов закупаются и устанавливаются в виде отдельных специализированных компонентов системы.

В цифровой подстанции используется стандартный состав оборудования, которое характеризуется многофункциональностью и многозадачностью элементов подстанции. Характерными признаками цифровой подстанции есть также уменьшение размеров подстанции и сокращение количества кабельных линий.

При проектировании в традиционных подстанциях используется большое разнообразие схем и аппаратов, основанных на соединении и монтаже кабелей, где любое изменение в схеме требует определённых затрат физического труда. При проектировании цифровых подстанциях используется система, построенная на стандарте МЭК 61850, важной особенностью которой является гарантированная доставка сообщений и высокая скорость передачи. В результате при разработке и внедрении проекта подстанции тратится меньше время на понимание структуры конкретного объекта, что значительно снижает стоимость проектирования. Большая часть аппаратов переходит в виртуальную плоскость. Наладка и настройки отдельных узлов подстанции значительно упрощаются.

При разработке документации и чертежей для традиционной подстанции требуются значительные затраты рабочего времени**.**

В случае цифровой подстанции упрощается автоматическое создание документации с помощью программного обеспечения.

При управлении проектом и пуско-наладке традиционные подстанции имеют длительный период времени между проектированием, монтажом и пуско-наладкой, предполагают большее число приёмок между этапами проекта, которые замедляют работу над проектом.

В цифровых подстанциях этапы от закупок и до монтажа стандартизированы и количество приёмок уменьшены, что предполагает быстрый ввод подстанции в работу.

Монтаж традиционной подстанции достаточно трудоёмкий.

Монтаж цифровой подстанции упрощается из-за отсутствия кабельных соединений.

На цифровой подстанции системы релейной защиты и управления построены на базе интеллектуальных микропроцессорных терминалов, и передача сигналов осуществляется в цифровом виде на всех уровнях управления. Все основные узлы станции подключены к выносным цифровым устройствам ввода/вывода, которые в свою очередь связаны по оптоволоконному кабелю с системой управления.

Работа цифровой подстанции основана на архитектуре, которая позволяет проводить эксплуатационные измерения в реальном времени по данным от первичной системы. Эти данные получаются с помощью датчиков, встроенных в первичную систему.

Обмен между устройствами, происходит по результатам измерений, базирующихся на "шине процесса". Самое главное в том, что интеллектуальные устройства и системы могут сразу обработать эти оперативные данные в пределах подстанции.

На рисунке 1 представлено сравнение традиционной и цифровой подстанции.

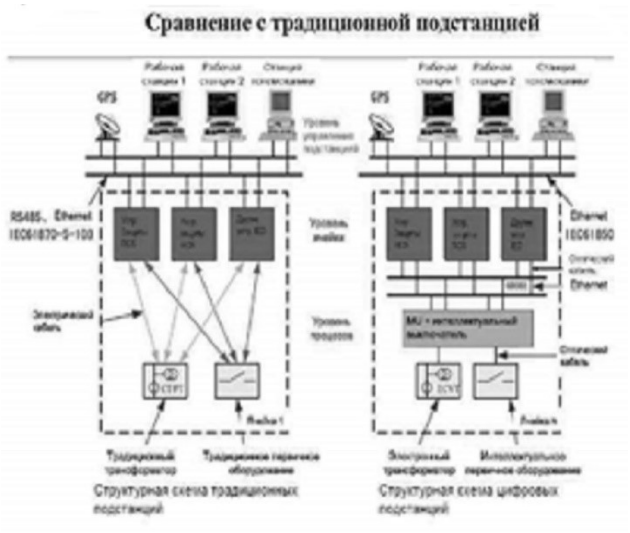


Рис.1. Сравнение традиционной и цифровой подстанции.

Основные характеристики цифровой подстанции

Отличительными характеристиками цифровых подстанций являются наличие встроенных в первичное оборудование интеллектуальных микропроцессорных устройств, применение локальных вычислительных сетей для коммуникаций, цифровой способ доступа к информации, её передаче и обработке, автоматизация работы подстанции и процессов управления ею.

В перспективе цифровая подстанция будет являться ключевым компонентом интеллектуальной сети (Smart Grid).

Внедрение систем автоматизации началось с появления систем телемеханики. Устройства телемеханики позволяли собирать аналоговые и дискретные сигналы с использованием модулей устройство связи с объектом (УСО) и измерительных преобразователей. На базе систем телемеханики развивались первые автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУ ТП) электрических подстанций и электростанций. АСУ ТП позволяли не только собирать информацию, но и производить её обработку, а также представлять информацию в удобном для пользователя интерфейсе.

С появлением первых микропроцессорных релейных защит информация от этих устройства также стала интегрироваться в системы АСУ ТП. Постепенно количество устройств с цифровыми интерфейсами увеличивалось (противоаварийная автоматика, системы мониторинга силового оборудования, системы мониторинга щита постоянного тока и собственных нужд и т.д.).

Вся эта информация от устройств нижнего уровня интегрировалась в АСУ ТП по цифровым интерфейсам.

Несмотря на повсеместное использование цифровых технологий для построения систем автоматизации, такие подстанции не являются в полной мере цифровыми, так как вся исходная информация, включая состояния блок-контактов, напряжения и токи, передаётся в виде аналоговых сигналов от распределительного устройства в оперативный пункт управления, где оцифровывается отдельно каждым устройством нижнего уровня. Например, одно и то же напряжение параллельно подаётся на все устройства нижнего уровня, которые преобразовывают его в цифровой вид и передают в АСУ ТП.

На традиционных подстанциях различные подсистемы используют различные коммуникационные стандарты (протоколы) и информационные модели. Для функций защиты, измерения, учёта, контроля качества выполняются индивидуальные системы измерений и информационного взаимодействия, что значительно увеличивает как сложность реализации системы автоматизации на подстанции, так и стоимость каждого компонента.

На рисунке 2 схематическое изображено строение цифровой подстанции.

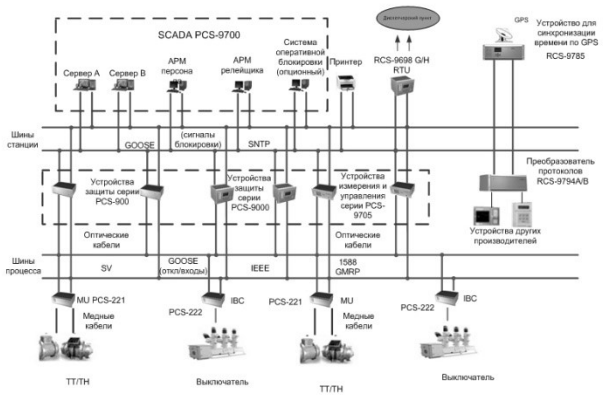


Рис. 2. Строение цифровой подстанции

Переход к качественно новым системам автоматизации и управления возможен при использовании стандартов и технологий цифровой подстанции, к которым относятся:
1. Стандарт МЭК 61850:
• модель данных устройств;
• унифицированное описание подстанции;
• протоколы вертикального (MMS) и горизонтального (GOOSE) обмена;
• протоколы передачи мгновенных значений токов и напряжений (SV);
2. Цифровые (оптические и электронные) трансформаторы тока и напряжения.
3. Аналоговые мультиплексоры (Merging Units).
4. Выносные модули УСО (Micro RTU).
5. Интеллектуальные электронные устройства (IED). Основной особенностью и отличием стандарта МЭК 61850 от других стандартов является то, что в нём регламентируются не только вопросы передачи информации между отдельными устройствами, но и вопросы формализации описания схем — подстанции, защиты, автоматики и измерений, конфигурации устройств.
В стандарте предусматриваются возможности использования новых цифровых измерительных устройств вместо традиционных аналоговых измерителей (трансформаторов тока и напряжения). Информационные технологии позволяют перейти к автоматизированному проектированию цифровых подстанций, управляемых циф-

ровыми интегрированными системами. Все информационные связи на таких подстанциях выполняются цифровыми, образующими единую шину процесса. Это открывает возможности быстрого прямого обмена информацией между устройствами, что, в конечном счёте, даёт возможность сокращения числа медных кабельных связей, и числа устройств, а также более компактного их расположения.

Использование оптоволоконных кабелей позволяют значительно снизить трудоёмкость и объёмы выполнения работ. Кроме того, переход на ЦП, даёт выход на существенно иной уровень стандартизации технических решений, и, как следствие, снижение количества ошибок, аварий, способствует повышению надежности.

Цифровая передача данных между устройствами – это возможность по-новому посмотреть на аппаратный состав этих систем.

Многие технические решения на энергообъектах принимаются, исходя из необходимости иметь разделённые друг от друга системы с разным функциональным назначением. Однако, когда речь идет про «цифру» и, в частности, про «оптику», где нет прямой гальванической связи между разными устройствами, всё становится иначе, появляется необходимость пересмотреть принятые, нормативы и объединить первичные измерения для всех подсистем на единой шине.

Чтобы эти принципы были практически воплощены и обеспечивали выполнение функций аппаратурой релейной защиты и противоаварийной автоматики (РЗА) и других устройств, необходимо решить ряд непростых задач. Прежде всего, необходимо разработать специальный протокол связи между устройствами, обеспечивающий доставку нужной информации в заданное время и с гарантированной точностью, чтобы цифровые измерительные потоки, попавшие в аппаратуру РЗА, правильно были расшифрованы, поэтому все источники измерений должны быть точно синхронизированы между собой.

Для решения вышеизложенных задач Международная электротехническая комиссия, разработала группу стандартов МЭК 61850 «Коммуникационные сети и системы подстанций».

Структура цифровой подстанции, выполненная в соответствии со стандартом МЭК 61850

Международный стандарт МЭК 61850 регламентирует представление данных о подстанции как объекте автоматизации, а также реализует протоколы цифрового обмена данными между микропроцессорными интеллектуальными электронными устройствами, включая устройства контроля и управления, релейной защиты и противоаварийной автоматики, счетчики электроэнергии и т.д. Стандартом определяется, что система автоматизации подстанции представляет собой набор функций различного назначения. Сюда включаются как функции, относящиеся к технологическому процессу (управление коммутационными аппаратами, измерения, работа релейной защиты), так и функции интерфейса: считывание данных, конфигурирование, запись файлов. Ввиду того, что в реализации одной функции может быть задействовано несколько устройств, в каждой из них удобно выделить несколько логических узлов. С другой стороны, один логический узел может участвовать в нескольких функциях.

Система автоматизации энергообъекта, построенного по технологии «Цифровая подстанция», делится на три уровня:

- полевой уровень (уровень процесса);
- уровень присоединения;
- станционный уровень.

Полевой уровень состоит из:

- первичных датчиков для сбора дискретной информации и передачи команд управления на коммутационные аппараты (micro RTU);
- первичных датчиков для сбора аналоговой информации (цифровые трансформаторы тока и напряжения).

Уровень присоединения состоит из интеллектуальных электронных устройств:

- устройств управления и мониторинга (контроллеры присоединения, многофункциональные измерительные приборы, счётчики АСКУЭ, системы мониторинга трансформаторного оборудования и т.д.);
- терминалов релейной защиты и локальной противоаварийной автоматики.

Станционный уровень состоит из:

- серверов верхнего уровня (сервер базы данных, сервер SCADA, сервер телемеханики, сервер сбора и передачи технологической информации и т.д., концентратор данных);
- АРМ персонала подстанции.

Внедрение МЭК 61850 дает возможность связать всё технологическое оборудование подстанции единой информационной сетью, по которой передаются не только данные от измерительных устройств к терминалам РЗА, но и сигналы управления.

На рисунке 3 представлена упрощенная структура цифровой подстанции.



Рис. 3. Структура цифровой подстанции

Зарубежный опыт использования цифровых подстанций

Первым крупным проектом по внедрению стандарта МЭК 61850 стала подстанция TVA Bradley 500 кВ США, введенная в эксплуатацию в 2008 г.

Цель проекта заключалась в проверке совместимости реализации стандарта МЭК 61850 в устройствах различных производителей.

Внедрение проекта позволило улучшить совместимость между устройствами различных производителей, повысить квалификацию персонала сетевой компании в части стандарта МЭК 61850, а также выявить проблемы, возникающие при его внедрении.

В 2009 г. в Испании была завершена работа над пилотным проектом подстанции Alcala de Henares 132 кВ (г. Мадрид). В реализации проекта использовались устройства различных производителей.

Особенностью данного проекта являлось экспериментальное внедрение «Шины процесса» в части передачи дискретной информации.

Большое развитие цифровые подстанции получили в Китае. В 2006 г. была введена в эксплуатацию первая цифровая подстанция 110 кВ Qujing, Yunnan. К 2016 г.

Китай занял лидирующее место в мире по цифровым подстанциям, введя в эксплуатацию 170 подстанций.

Ожидается, что рынок цифровых подстанций в Китае вырастет до 6—7,5 млрд юаней в год за ближайшие 10 лет.

Внедрение цифровых технологий на подстанциях Российской Федерации

В 2011 году ведущими российскими компаниями (ООО НПП «ЭКРА», ООО «Энергопром Автоматизация», ЗАО «Профотек» и ОАО «НИИПТ») было подписало генеральное соглашение об организации стратегического сотрудничества с целью объединения научно-технических, инженерных и коммерческих усилий для создания цифровой подстанции на территории РФ.

В соответствии с МЭК 61850, разработанная система состоит из трёх уровней. Шина процесса представлена оптическими трансформаторами (ЗАО «Профотек») и выносным УСО (micro RTU) NPT Expert (ООО «Энергопром Автоматизация»). Уровень присоединения — микропроцессорные защиты ООО НПП «ЭКРА» и контроллер присоединения NPT BAY-9-2 ООО «Энергопром Автоматизация». Оба устройства принимают аналоговую информацию по МЭК 61850-9-2 и дискретную информацию по МЭК 61850-8-1(GOOSE). Станционный уровень реализован на базе SCADA с поддержкой МЭК 61850.

В рамках совместного проекта была разработана также система автоматизированного проектирования ЦПС — SCADA Studio, проработана структура сети Ethernet для различных вариантов построения, собран макет цифровой подстанции и проведены совместные испытания, в том числе на испытательном стенде в ОАО «НИИПТ».

Действующий прототип цифровой подстанции был представлен на выставке «Электрические сети России-2011». Внедрение пилотного проекта и выход на полномасштабное производство оборудования цифровой подстанции запланирован на 2012 год. Российское оборудование для «Цифровой подстанции» прошло полномасштабное тестирование, подтверждена также его совместимость по стандарту МЭК 61850 с оборудованием различных зарубежных (Omicron, SEL, GE, Siemens и др.) и отечественных (ООО «Прософт-Системы», НПП «Динамика» и др.) компаний.

Разработка собственного российского решения по цифровой подстанции позволит не только развивать отечественное производство и науку, но и повысить энергобезопасность нашей страны. Проведённые исследования технико-экономических показателей позволяют сделать вывод, что стоимость нового решения при переходе на серийный выпуск продукции не будет превышать стоимости традиционных решений

построения систем автоматизации и позволит получить ряд технических преимуществ таких как значительное сокращение кабельных связей, повышение точности измерений величин, простота проектирования, эксплуатации и обслуживания, унифицированная платформа обмена данными, высокая целевая помехозащищённость, высокая пожаро-взрывобезопасность и экологичность, снижение количества модулей ввода/вывода на устройства АСУ ТП и РЗА, обеспечивающее снижение стоимости устройств.

Заключение

Развитие энергетической отрасли в условиях функционирования энергорынка предъявляет повышенные требования к системам получения информации, ее передаче и обработке.

Цифровые подстанции — это подстанции с высоким уровнем автоматизации управления технологическими процессами, оснащенные развитыми информационно-технологическими и управляющими системами и средствами, в которых все процессы информационного обмена между элементами подстанции, информационного обмена с внешними системами, а также управления работой подстанций осуществляются в цифровом виде на основе протоколов стандартов.

Диджитализация подстанций затронула, в основном, системы релейной защиты, управления и автоматики. Новые решения обязаны соответствовать основным требованиям, предъявляемым к этим системам. Стандарт МЭК 61850 довольно подробно определяет вектор развития цифровых технологий в электроэнергетике, ставя во главу угла непоколебимость этих принципов.

Для того чтобы усовершенствованные устройства могли передавать и использовать цифровые данные, при разработке концепции Smart Grid возникла необходимость создания новой информационной модели коммуникации. На сегодняшний день разработана модель организации системы автоматизации подстанций, сформирован набор данных, участвующих в передаче по логической вычислительной сети, сформулированы требования к протоколам передачи данных. Протокол МЭК 61850 продолжает развиваться. Обновленные документы содержат указания по организации связи нескольких подстанций на уровне присоединения, а также разрабатываются описания наборов данных для объектов малой энергетики и возобновляемых источников энергии.

Список литературы

1. Нормы технологического проектирования подстанции переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС). Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.10.248, 2017.
2. *Чичев С.И.* Методология проектирования цифровой подстанции в формате новых технологий / С.И. *Чичев, В.Ф. Калинин, Е.И. Глинкин. М.*: Издательский дом «Спектр», 2015. 228 с.
3. *Горелик Т.Г.* Цифровая подстанция. Подходы к реализации / *Т.Г. Горелик, О.В. Кириенко* // Энергетик, 2015. №2. 15-17 с.
4. *Епифанов А.М.* В цифровых подстанциях мы видим огромный потенциал / *А.М. Епифанов* // Электроэнергия. Передача и распределение, 2016. № 1 (34) 6-12 с.

References

1. Norms of technological design of substation of alternating current with the highest voltage of 35-750 kV (NTP PS). Standard organization of JSC "FGC UES" STO 56947007 - 29.240.10.248, 2017.
2. *Chichev S.I.* Methodology of digital substation design in the format of new technologies / *S. I. Chichev, V. F. Kalinin, E. I. Glinkin*. Moscow: publishing house "Spectr", 2015. 228 PP.
3. *Gorelik T. G.* Digital substation. Approaches to implementation / *T. G. Gorelik, O. V. Kiriyenko* / / Energetik, 2015. No. 2. 15-17 PP.
4. *Epifanov A.M.* in digital sub-stations we see a huge potential / *A. M. Epifanov* / / Elektronenergiya. Transmission and distribution, 2016. No. 1 (34) 6-12 p.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

Геотермальная установка для выработки тепловой и электрической энергии

В.В. Кувшинов[1], Е.Г. Какушина[2], Л.М. АбдАли[3], Ф. М Аль-Руфаи[4], Х. А. Исса[5]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]kuvshinov.vladimir@gmail.com, [2]littie@mail.ru, [3]laithm.abood@uokufa.edu.iq,[4]fa99ez@mail.ru, [5]hayderissa10@gmail.com

Статья поступила 23.01.2020 г.; после доработки 27.01.2020 г.

Аннотация

В статье представлена возможность использования геотермальной энергии для производства электроэнергии при средних температурах. Авторы рассмотрели два варианта их изучения, а именно двусторонние циклы и термоэлектрические генераторы. После сравнительного изучения предлагаемого решения, было выбрано и предложено решение для наземной теплоэлектростанции. Преимущества основаны на том факте, что он находится в важном резервуаре с термальной водой при средних температурах, что может быть использовано для успешного внедрения решения для доступа к электричеству на небольших гидроэлектростанциях, предоставленных авторами. Это решение является одним из самых современных в области геотермальной воды при средних температурах.

Ключевые слова: геотермальная энергия, экономический анализ

Geothermal plant for generating heat and electricity

V.V. Kuvshjnov[1], E.G. Kakyshina[2], L.M. AbdAli[3], F. M Al-Rufai[4], H.A. Issa[5]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. 1kuvshinov.vladimir@gmail.com, 2littie@mail.ru, 3laithm.abood@uokufa.edu.iq,4fa99ez@mail.ru, 5hayderissa10@gmail.com

Received 23.01.2020 y.; received in final form 27.01.2020 y.

Abstract

The article presents the possibility of using geothermal energy to generate electricity at medium temperatures. The authors considered two options for their study, namely, bilateral cycles and thermoelectric generators. After a comparative study of the proposed solution, a solution for a ground-based thermal power plant was selected and proposed. The advantages are based on the fact that it is located in an important tank with thermal water at medium temperatures, which can be used to successfully implement a solution for access to electricity at small hydropower plants provided by the authors. This solution is one of the most advanced in the field of geothermal water at medium temperatures.

Keywords: geothermal energy, economic analysis.

Введение

В настоящее время и мир, и Ирак сталкиваются с растущей необходимостью использования ископаемого топлива. Но эти виды топлива становятся все более дорогими и загрязняющими. По этой причине как в мире, так и в Ираке наблюдается заметная ориентация на использование нетрадиционных и экологически чистых видов топлива [1].

Геотермальная энергия включена в эту категорию, поскольку является возобновляемым ресурсом и может способствовать значительному

сокращению выбросов углерода и парникового эффекта.

Хотя производство электроэнергии не может быть полностью заменено с использованием нетрадиционных источников энергии, получение энергии с использованием нетрадиционных и дешевых видов топлива определяет снижение цен в этой области и существенное сокращение загрязнения [2]. Продвижение Передача технологий на рынке электроэнергии с использованием нетрадиционных источников является необходимостью [3].

Анализ технического решения

В прошлом было четыре различных способа получения электричество из геотермальных источников:

- расширение парового цикла;
- бинарный цикл: - органический цикл Ренкина (ORC);
- Калинский цикл;
- термоэлектрические генераторы.

Анализ вышеупомянутых процессов конверсии, в первую исключаются установки, использующие термоэлектрические генераторы, поскольку их эффективность составляет всего одну десятую по сравнению с эффективностью цикла Карно [4]. Другие анализируемые процессы имеют эффективность около половины цикла Карно. Теоретически, эффективность Карно является самой высокой, которая может быть достигнута путем преобразования тепловой энергии в механическую [5].

Карно эффективность используется только в качестве ссылки, потому что для его получения потребуется бесконечное количество генераторов и пределы второго принципа термодинамики будут превышены [6].

Как упомянуто выше, паровой цикл расширения считается неэкономичным, за исключением случаев, когда температура геотермального агента выше 220°C [7]. Когда температура ниже этого уровня, количество пара, существующего после сепаратора, сильно уменьшается, и только небольшая часть энергии геотермального агента может быть использована для получения электричества [8].

В случае бинарных циклов гораздо большая часть энергии геотермального агента может быть использована для получения электроэнергии [9].

Помимо малой эффективности геотермальной жидкости в системе парового расширения, в случае малых температур трудно найти подходящие турбины для работать при низком давлении. Это основная причина, почему были разработаны процессы, основанные на бинарных циклах. Когда количество тепла уменьшается и, следовательно, когда мощность установки уменьшается, использование других жидкостей, кроме воды, становится экономичным [10].

Следовательно, в анализируемом случае рассматриваются только циклы ORC и Калина. На рисунке 1 сравниваются циклы Калина и ORC из точки зрения эффективности. Для цикла ORC рабочим телом является isopentan [11]. Как видно на представленном графике (рис.1.) цикл имеет лучшую эффективность, чем цикл ORC с изобутаном.

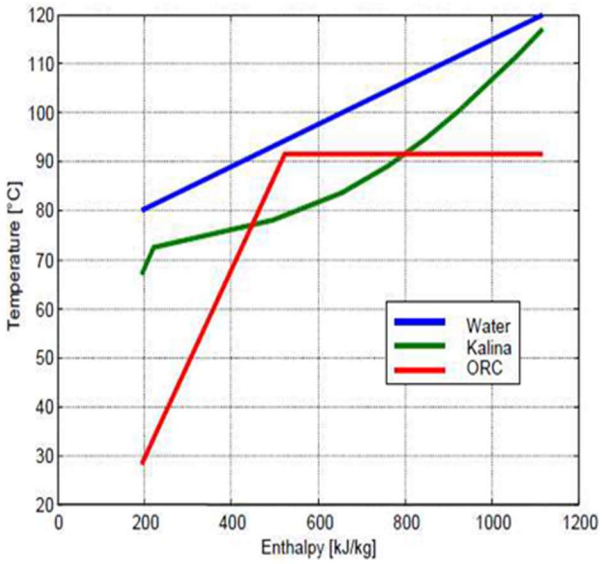


Рис. 1. Калина и ORC (isopentan) циклов эффективности сравнение.

На рисунке 2 сравниваются циклы Калины и ORC с теоретической точки зрения обеспеченных чистых мощностей [12]. Непрерывные линии характеризуют цикл Калины, а пунктирные линии - цикл ORC. Линии, отмеченные (+), определяют решение для высокой мощности, а линии, отмеченные (o), предназначены для низких затрат.

Как видно из графика, при той же температуре входного геотермального агента цикл Калины теоретически дает более высокую полезную мощность [13]. Геотермальная вода с температурой 100°C извлекается из 4796 скважинных станций с помощью погружного насоса, характеризующегося следующими параметрами: P = 150 кВт и D = 70 л / с.

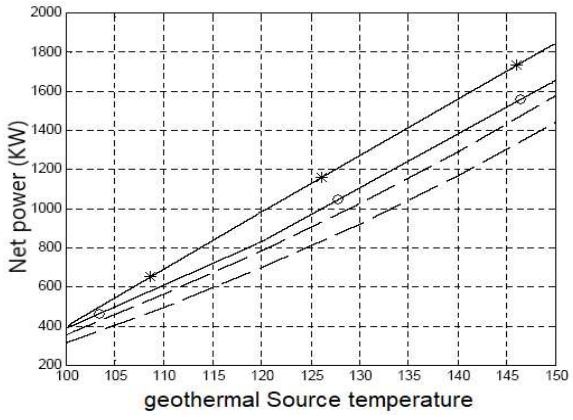


Рис. 2. Калины и ORC (изопентан) циклов чистых мощностей сравнение.

В случае длительной работы погружной насос потребляет около 27 кВт и обеспечивает следующие параметры геотермальной воды:

p = 1,3 бар и D = 30 л / с.

Геотермальная вода с ранее упомянутыми параметрами циркулирует через насосы (1) в испарителе с теплообменниками (2), которые передают тепло рабочему веществу (раствор аммиака и воды).

Таким образом, температура геотермальной воды снижается примерно до 70°C, а затем эта вода направляется на геотермальную установку, расположенную поблизости [14].

Циркуляция рабочего агента осуществляется подающими насосами (10). Получая тепло геотермальной воды, рабочий агент испаряется, и его температура возрастает примерно до 95°C [15].

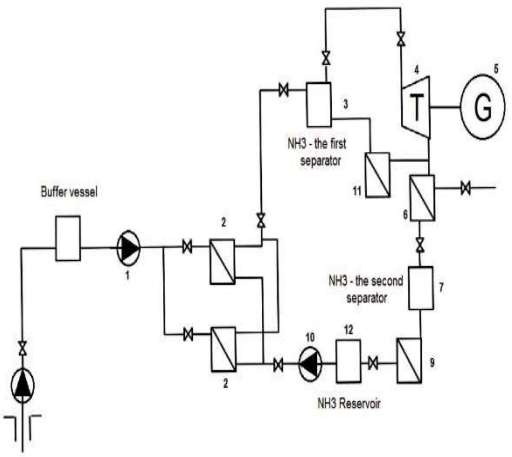


Рис 3. Принципиальная тепловая схема нового электро-геотермического завода (CEGt)

Анализ показателей экономического проекта

Для экономической эффективности при анализе были учтены следующие предпосылки:

- годовой период эксплуатации CEGt (электрогеотермальной электростанции) составляет 3,953 ч / год;
- текущая цена электроэнергии, поставляемой сетью, равна 90,9 евро / МВтч;
- период, рассматриваемый для анализа, составляет 20 лет;
- инвестиции начнутся в момент «нуля», а новое оборудование будет эксплуатироваться, начиная с 1-го года;
- ставка дисконтирования составляет = 12% [16];
- капитальный ремонт проводится в периоды, когда CEGt прерывает свою работу; таким образом, капитальный ремонт не влияет на продолжительность годового производства рассматриваемой электроэнергии и тепловой энергии;
- расходы на капитальный ремонт были равномерно распределены в течение анализируемого периода (20 лет), в качестве технического обслуживания расходы и обслуживание;
- расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание (включая расходы на персонал) увеличились на 1% в год в течение анализируемого периода [17].

Затраты и доходы [22], лежащие в основе расчета Экономическая эффективность рассматривалась следующим образом:

- период, рассматриваемый для анализа, составляет 20 лет;
- инвестиции начнутся в момент «нуля», новое оборудование будет эксплуатироваться, начиная с 1-го года;
- ставка дисконтирования составляет = 12%.

Технико-экономическое обоснование

В технико-экономических обоснованиях и анализах чистая приведенная стоимость представляет в обобщенном виде инвестиции эффективность, в течение определенного периода эксплуатации и ставка дисконта выбирается в особых условиях для реализации инвестиций [18].

Этот показатель рассчитывается по формуле (1):

$$VNA = \sum_{i=1}^{n} B_i \times (1+a)^{-i} - \sum_{j=0}^{d} I_j \times (1+a)^{-j} \qquad (1)$$

Где:

Vi - общая сумма дохода за год "i";

Ci - общая сумма расходов за год "i";

Ii - это общая стоимость инвестиций в год "i";

n - время работы, учтенное в годах с учетом год 1, год, показывающий первые инвестиции статьи расходов;

d - продолжительность в годах периода планирования вложения;

a - учетная ставка [19].

Внутренняя норма доходности устанавливает инвестиционные возможности для обеспечения чистого дохода (прибыли) в рассматриваемом расчетном периоде с учетом всех понесенных затрат и в то же время обеспечивает легкое восстановление (амортизацию) вложенного капитала [20]. IRR представляет собой сложную процентную ставку, которая, используемая в качестве ставки дисконта при расчете NPV, приводит к значению «0» для нее [9].

Общий IRR должен быть выше, чем банковская процентная ставка плюс маржа безопасности, таким образом, согласно формуле (2):

$$IRR \succ \left[\frac{d}{100} + \frac{r_i}{100} + \frac{r_r}{100} \right] \times 100 \qquad (2)$$

Где:

d - Банковская процентная ставка;

ri - уровень инфляции;

rr - уровень риска.

Анализ данных показывает, что инвестиции окупаются в 8 лет.

Анализ чувствительности

В неопределенных условиях необходимо проанализировать факторы, которые могут повлиять на эффективность инвестиций в случае изменения данных, послуживших основой для прогнозов.

В этом случае из значений, принимаемых во внимание, наиболее важными являются цена покупки оборудования CEGt, цена электроэнергии, цена энергии, чистая эффективность (доходность) CEGt.

Соответственно, анализ чувствительности учитывал поведение экономических показателей в зависимости от изменения указанных значений.

Результаты анализа чувствительности подчеркивают следующие выводы.

Изменения, касающиеся цены приобретения CEGt.

Наблюдение: из-за постоянного совершенствования технологий производства и относительно низкого спроса на рынке, цена CEGt может стать ниже эталонной стоимости.

Снижение цены приобретения CEGt (рис.4) оказывает положительное влияние на экономические показатели инвестиционного проекта. Вероятность снижения цены приобретения является относительно низкой из-за роста удельных затрат электро-геотермальной установки (нелинейных) в случае установок, мощность которых меньше 1000 кВт.

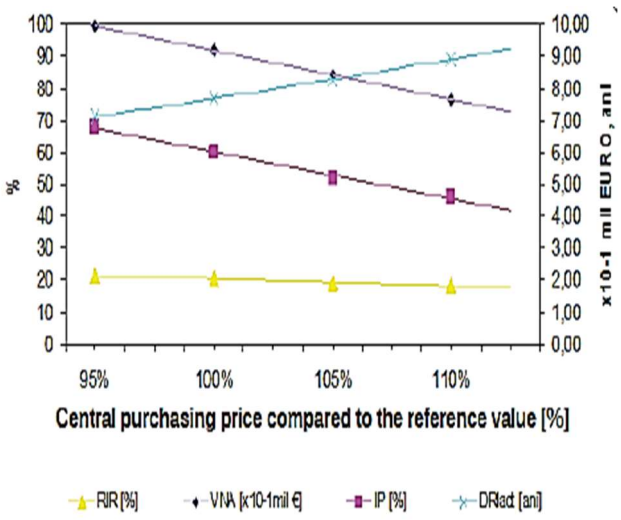


Рис. 4. Чувствительность экономических показателей проекта к изменению цены приобретения CEGt.

Анализ чувствительности экономического показателя в проекте на случай изменения предоставленной цены на электрическую энергию.

20-летний период обучения.

Изменения цен на электроэнергию Увеличение цены на предоставленную электроэнергию (рис. 5) имеет относительно низкое положительное влияние на экономические показатели инвестиционного проекта.

Вероятность обеспеченного роста цен на электроэнергию относительно высока. Увеличение цены на предоставленную электроэнергию на 10% приводит к снижению PPact на 5%.

Проведен анализ чувствительности экономического показателя в проекте на случай изменения предоставленной цены на тепловую энергию.

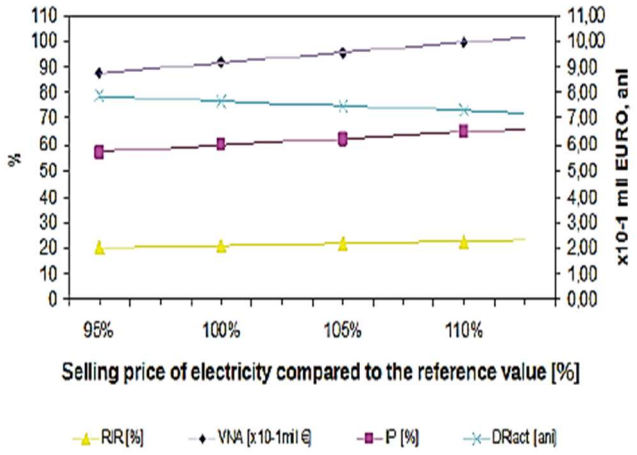


Рис. 5. Чувствительность экономических показателей в проекте для случая, когда они обеспечивают изменения цен на электроэнергию при контрольном значении.

- 20 лет учебного периода.

Изменения, касающиеся предоставленной цены тепловой энергии. Кроме того, увеличение цены предоставляемой тепловой энергии (рис. 6) оказывает положительное влияние на экономические показатели инвестиционного проекта. Вероятность обеспеченного роста цен на тепловую энергию относительно высока. Увеличение предоставляемой тепловой мощности

цена с 10% приводит к снижению PPact на 10,5%.

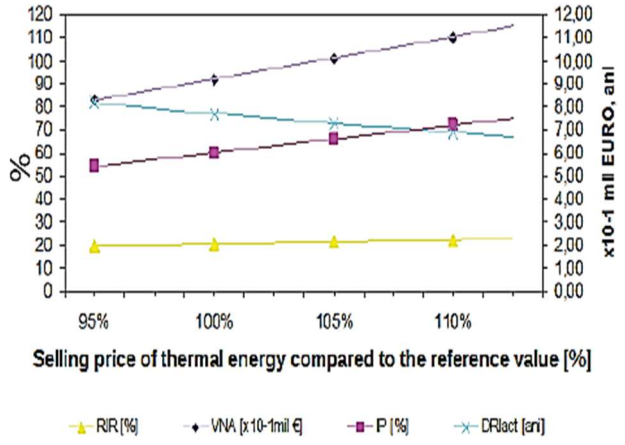


Рис. 6. Чувствительность экономических показателей в проекте к случаю изменения предоставленной цены на тепловую энергию.

Анализ чувствительности экономического показателя в проекте на случай изменения чистой эффективности (доходности) CEGt

- 20 лет обучения.

Изменения, касающиеся чистой эффективности приобретения завода.

Снижение эффективности (доходности) CEGt оказывает негативное влияние (рис. 7) на экономические показатели инвестиционного проекта. Вероятность снижения эффективности CEGt следует учитывать из-за относительно низкой температуры геотермального источника воды. Снижение эффективности на 5% приводит к росту PPact на 4%.

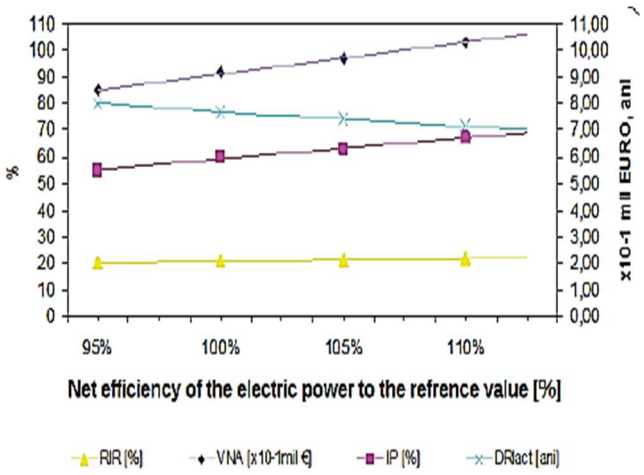


Рис. 7. Чувствительность экономических показателей проекта к полученному ЦЭГт чистому изменению эффективности.

Повышение эффективности CEGt оказывает положительное влияние на экономические показатели инвестиционного проекта. Вероятность роста эффективности CEGt относительно низка из-за низкой температуры геотермального источника воды и малой мощности станции. Увеличение эффективности на 10% приводит к росту PPact на 6,9%.

Выводы

Инвестиционная доходность по сравнению с использованием обычного топлива.

Расчет учитывает:

Conventional 1 Гкал условного топлива – 37,800 IQD / Гкал (приблизительно 28 евро / Гкал);

1 Гкал геотермальной энергии - 28,400 IQD / Гкал (приблиз. 21 евро / Гкал);

Для производства 1 кВт необходимо:

1 кВт × ч = 103 Вт × 3,6 × 103 с = 3,6 × 106 Дж

Болотный газ (калорийность q = 35,5 МДж / м3) должен быть сгорел до получения 1 кВтч - 35,5 × 106 Дж / м3.

V = 0,101 м3 CH4

стоимость = 26,732 IQD (приблизительно 19.8 евро)

Геотермальная энергия - 4,187 x 106 Дж

V = 0,011 м3

Стоимость = 311,600 IQD (приблизительно 0,23евро)

Это приблизительно соответствует годовой поставленной электроэнергии – 270,000 кВт.

Стоимость футляра для ископаемого топлива – 720,655,831 IQD (приблизительно 533,810 евро).

Стоимость для случая геотермальной энергии 84,139,607 IQD (приблизительно 62,350 евро).

Полученная годовая экономия составляет 636,814,054 IQD (приблизительно 471,678 евро).

Из представленного выше анализа затрат и выгод следует, что возврат инвестиций будет достигнут через 1,4 года.

Список литературы

1. АбдАли Л. М. Анализ производительности гибридных фото-ветроэлектрических установок./ Ф. М. Аль-Руфаи, Б. А. Якимович и В. В. Кувшинов// Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 61-68.
2. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
3. Аль-Руфаи Ф. М. Электроэнергия в Ираке: кризис и решение. / Абдали Л.М., Кувшинов, В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Том 5, № 2. С. 74-79.
4. Абд Али Л.М., Исса Г.А. Гибридная энергетика с использованием солнечной и ветровой энергии. Молод. Учен., - 2018. Т. 5. № 2. С. 19–26.
5. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
6. Кувшинов В.В. Использование солнечных электростанций для обеспечения энергетической безопасности Крымского региона. / Ф. М. Аль-Руфаи и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 252–255.
7. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Е.Г. Какушина, Д.Д. Смирнова // Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 1. С. 47-50.
8. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153–158.
9. Кувшинов В.В. Исследование характеристик фотоэлектрической решетки с изменением поверхностной освещенности решетки. / АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г., Крит, Б. Л., Морозова, Н. В., Кувшинова В. В.// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 223–228.
10. 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.
11. Гурьев В.В. Совершенствование методов прогнозирования генерирующих мощностей солнечных электростанций: на примере энергосистем Республики Крым и города Севастополя /Якимович Б.А., Абд Али Л.М. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 242–246.
12. 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.
13. 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.
14. Гурьев В.В. Совершенствование методов прогнозирования генерирующих мощностей солнечных электростанций: на примере энергосистем Республики Крым и города Севастополя. /Якимович Б.А., Абд Али Л.М. и др. // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 242–246
15. 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.
16. Крит Б.Л. Изменение энергетических характеристик фотоэлектрических элементов путем модификации нанокластеров серебра приемной поверхности. / Федотикова М.В., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Горожеев, М.Ю. Кувшинов В.В., Морозова Н.В.// Journal of Physics: Conference Series 1396(1),012024
17. Какушина Е.Г. Технико-экономический анализ эффективности ветро-солнечных установок на основе теории сложности. /Соломенникова С.И., Якимович Б.А.// В книге: Системы контроля окружающей среды - 2019 Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2019. С. 74.
18. АбдАли Л. М. Моделирование и моделирование приливной энергии /Ahmed Mohmmed, H. и другие// Appl. Sci., 2019, № 14, с. 3698–3706.
19. АбдАли Л. М. Новый дизайн 7-уровневого диодного зажимного инвертора. /Хайдер Ахмед Мохмед и Хусам Абдулхусейн Ваххаб// Журнал

инженерных и прикладных наук, 2019, № 14, С.. 3666-3673.
20. Ахмед Мохммед Х. Производство электроэнергии с использованием гибридной системы (фотоэлектрических и топливных элементов). / Анссари М.О.Х. и Абд Али Л.М. J.// Appl. Энергия, 2019, № 14, С. 4414–4418.

References

1. AbdAli L.M. Performance Analysis of Hybrid Photovoltaic Wind Turbines / F.M. Al-Rufai, B. A. Yakimovich and V. V. Kuvshinov // Power Plants and Technologies - 2019. T. 5. No. 2. P. 61-68.
2. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic installations to provide thermal and electric energy to Sevastopol/ E.G. Kakushina, A.D. Vasiliev, A.A. Goretsky // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 51-57.
3. Al-Rufai F. M. Electricity in Iraq: crisis and solution. / Abdali L.M., Kuvshinov, V.V. // Power plants and technologies - 2019.Vol. 5, No. 2. P. 74-79.
4. Abd Ali L.M., Issa G.A. Hybrid energy using solar and wind energy. Young Scient., - 2018.Vol. 5. No. 2. P. 19–26.
5. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations in the generation of heat and electric energy from one receiving surface / E.G. Kakushina // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 45-50.
6. Kuvshinov V.V. The use of solar power plants to ensure energy security of the Crimean region. / F.M. Al-Rufai and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, S. 252–255.
7. Kuvshinov V.V. Study of the seasonal operation of the industrial photovoltaic module PS 250 / E.G. Kakushina, D.D. Smirnova // Power plants and technologies - 2017. T. 3. No. 1. P. 47-50.
8. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 3, pp. 153–158.
9. Kuvshinov V.V. Study of the characteristics of the photoelectric grating with a change in the surface illumination of the grating. / AbdAli L. M., Kakushina, E. G., Crete, B. L., Morozova, N.V., Kuvshinova V.V.// Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, S. 223–228.
10. Vologdin S.V. Analysis of various scenarios of Crimea's energy supply, taking into account the operating modes of the solar power station. / Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L.M., Kakushina, E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume 55, No. 4, pp. 229–234.
11. Guryev V.V. Improvement of forecasting methods for generating capacities of solar power plants: on the example of power systems of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, S. 242–246.
12. Guryev V.V. Development of renewable energy sources in the energy system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / Kakushina E.G., Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V.// Power plants and technologies - 2019.V. 5. No. 2. S. 90-93.
13. 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.
14. Guriev V.V. Improvement of forecasting methods for generating capacities of solar power plants: on the example of power systems of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol. / Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. et al. // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, S. 242–246
15. Zaichenko V.M. Directions of energy development. / Chernyavsky A.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Abeydulin S.A.// Power plants and technologies. 2019 - T. 5. No. 3. P. 53-61.
16. Crete B.L. Changing the energy characteristics of photovoltaic cells by modifying the receiving silver nanoclusters. / Fedotikova M.V., Sleptsov V.V., KuKushkin D.Yu., Gorozheev, M.Yu. Kuvshinov V.V., Morozova N.V. // Journal of Physics: Conference Se-ries 1396 (1), 012024
17. Kakushina EG Feasibility study of the efficiency of wind-solar installations based on the theory of complexity. / Solomennikova S.I., Yakimovich B.A. // In the book: Environmental Monitoring Systems - 2019 Abstracts of the International Scientific and Technical Conference. 2019.S. 74.
18. AbdAli L. M. Modeling and modeling of tidal energy / Ahmed Mohmmed, H. and others // Appl. Sci., 2019, No. 14, p. 3698-3706.
19. AbdAli L. M. The new design of the 7-level diode clamping inverter. / Hyder Ahmed Mohmed and Husam Abdulhuseyn Wahhab // Journal of Engineering and Applied Sciences, 2019, No. 14, P .. 3666-3673.
20. Ahmed Mohmmed H. Electricity production using a hybrid system (photovoltaic and fuel cells). / Anssari M.O.H. and Abd Ali L.M. J.// Appl. Energy, 2019, No. 14, pp. 4414–4418.

УДК 620.92

Установка трекерных систем для повышения генерации электрической энергии солнечными батареями

В.В. Кувшинов[1], Е.Г. Какушина[2], Д.А. Каширин [3]
ФАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]*kuvshinov.vladimir@gmail.com,* [2]*littie@mail.ru*, [3]*jaens@bk.ru*

Статья поступила 28.01.2020 г.; после доработки 29.01.2020 г.

Аннотация
В статье приведены исследования трекевых систем слежения за Солнцем, используемых для увеличения выработки электрической энергии кремниевыми панелями, с учетом установки наиболее оптимального угла падения лучей на рабочую поверхность модуля. Для изменения угла наклона применяется домкратная без поворотная система на четырех опорах. Полученные данные показывают значительное увеличение генерирующих характеристик солнечных электрических батарей и повышение эффективности работы всей установки.

Ключевые слова: трекевые системы, энергия кремниевых панелей, без поворотная система на четырех опорах.

Installation of tracker systems to increase generation electric energy solar panels

V.V. Kuvshjnov[1], E.G. Kakyshina[2], D.A. Kashirin[3]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]*kuvshinov.vladimir@gmail.com,* [2]*littie@mail.ru,* [3]*jaens@bk.ru*

Received 28.01.2020 y.; received in final form 29.01.2020 y.

Abstract
he article presents studies of tracking systems for tracking the sun, which are used to increase the production of electrical energy by silicon panels, taking into account the installation of the most optimal angle of incidence of rays on the working surface of the module. To change the angle of inclination, a jack without a rotary system on four supports is used. The data obtained show a significant increase in the generating characteristics of solar electric batteries and an increase in the efficiency of the entire installation.

Keywords: track systems, energy silicon panels, without a rotary system on four supports.

Введение

Применение фотоэлектрических преобразователей стало увеличиваться благодаря использованию новых полупроводниковых материалов.

За счет повышения коэффициента полезного действия, удешевления стоимости и качественного улучшения характеристик [1], стало расширяться область применения фотоэлектрических преобразователей, выполнение на их основе солнечных батарей.

Повысить эффективность генерации солнечных панелей позволило применение подвижных механизмов, что имели возможность поворота по одной или по двум осям.

Такой механизм называется – трекер. При увеличении площади солнечной установке стали появляться препятствия, связанные с поломкой из-за сильных воздушных порывов.

В данной работе будет предложена система многоопорного механизма с возможностью переориентировать расположения панели с одного положения на другое [3].

Постановка задачи и целей исследования

Солнечные панели, устанавливающиеся на неподвижную конструкцию в фиксированном положении, широко применяются благодаря простоте их реализации. Не смотря на легкость их конструкции, необходимо правильно подобрать угол относительно которого панель будет располагаться для генерации солнечной энергии. Рабочий угол выбирается относительно широты земли.

Целью исследования являлось получение экспериментальных данных при работе трековой системы ориентации на Солнце, совмещенной с фотоэлектрической панелью [2].

Угол между горизонтальной плоскостью и солнечной панелью, называется — угол наклона. Это рабочий параметр, способствующий при изменении его параметра увеличивать коэффициент полезного действия при выработке электроэнергии.

Как известно для улучшения генерации необходимо ориентировать панель относительно падающих солнечных лучей на оптимальный угол. Таковой угол является 90 градусов.

При этом можно смело заявить, что панели, установленные на неподвижном, статичном каркасе не имеет физической возможности для поддержания оптимального угла в течении всего светового дня. Вследствие этого, мы имеем большие потери полезной мощности при увеличении отклонения при падении солнечного луча относительно оптимального угла.

При выборе оптимального угла следует учитывать, что вследствие движения Земли вокруг Солнца, существуют сезонные вариациями прохождения солнечного шара по небосводу, которыми нельзя пренебрегать.

Угол падения солнечных лучей, который достигается в зимний и летний период разительно отличаться, что влечет за собой сезонные корректировки оптимального угла для солнечной панели. Было выявлено, что в летний период солнечную панель необходимо располагать горизонтально, а в зимний период вертикально [10].

Следует отметить, что угол наклона для работы летом выбирается меньше, чем для работы зимой. Если не предоставляется возможность изменения дважды в год угла наклона, то выбирается максимально оптимальный угол, значение которого лежит примерно посередине между оптимальным углом для летнего и зимнего периода. В связи с тем, что устанавливаются панели на разных широтах, под каждую из них был рассчитан свой оптимальный угол. Панели фотоэлектрического модуля (ФЭМ), что расположены ближе к экватору, ориентируются практически полностью горизонтально. Но даже там они устанавливаются под небольшим углом, чтобы дать возможность смыть дождям грязь.

В весенний и осенний период времени угол наклона за оптимальный угол принимается значение широты местности.

В зимний сезон к этому значению прибавляется 15 градусов, а в летнее время аналогично вычитается [4]. По этой причине и считается, что необходимо дважды в год изменять угол наклона, а именно с «летнего» на «зимний».

Как и было ранее сказано, при отсутствии таковой возможности, выбирается оптимальный угол, а также выбирается примерно равный широте местности. На рисунке 1 приведена схема исследовательского стенда.

Из рисунка видно, что угол βм в течении сезона необходимо менять на 15°С.

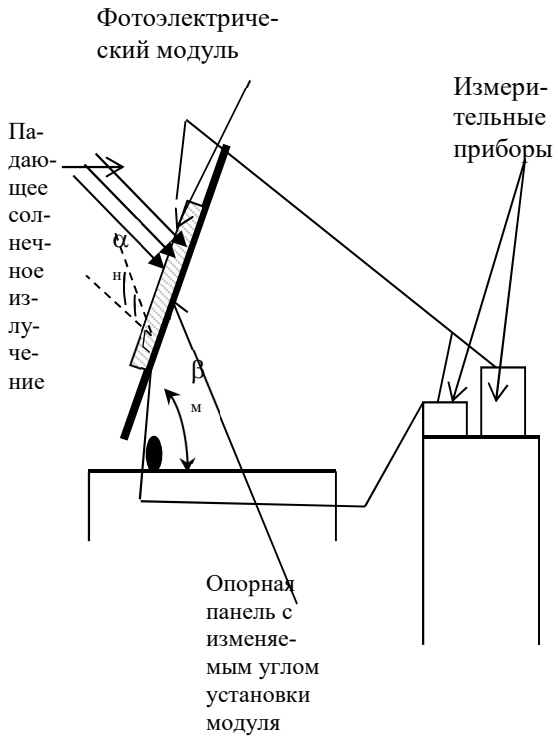


Рис.1. Стендовая установка для измерения характеристик фотоэлектрического модуля при изменении угла наклона модуля и в зимний и летний период

Угол берётся из таблицы, в которой указаны приемлемые значения, а именно при какой широте, необходимо взять наиболее оптимальный угол наклона (таблица 1).

Таблица 1. *Оптимальные углы наклона солнечных батарей для различных широт*

Широта местности	Угол наклона
0°— 10°	0°
10° — 15°	±5° к широте местности
15° — 30°	± 10° к широте местности
30° — 45°	± 15° к широте местности
45° —55°	± 20° к широте местности
Больше 55°	± 25° к широте местности

Проведение исследований и их результаты

Помимо неподвижных платформ, в рядах солнечных панелей существует множество видов каркасной основы на подвижном механизме. Таким образом, существует возможность сохранить перпендикулярное положение солнечной панели относительно падающих лучей. Вследствие чего достаточное количество теряемой полезной мощности на статических солнечных панелях в полной мере преобразуется в электроэнергию.

Одним из методов автономной ориентации солнечного полотна являются механизм, который называется – трекер. Они могут быть одноосевые и двухосевые. Рациональный выбор одного из двух методов зависит только от местности, на которой будет располагаться солнечная панель.

Одноосевые трекеры хороши при условии, что солнечные панели располагаются в непосредственной близости к экватору. Не смотря на их автономное поддерживание оптимального угла ориентирования солнечной панели по одной оси, для максимальной выработки и генерации солнечной энергии, при отдалении места расположения устанавливаемой солнечной панели, для компенсации сезонных климатических сдвигов существует необходимость ручной корректировки угла по широте [8, 12].

При использовании трекера, что способен поддерживать автономное отслеживание места расположения солнца по двум осям, исключается необходимость вмешательства со стороны человека, для корректировки сезонного угла наклона.

В отслеживающих системах с двумя осями, солнечные лучи всегда перпендикулярны панели. Контролируется момент отслеживания двумя методами [5]. Первый из них является фотодатчик, что отслеживает место расположения солнца благодаря специальной конструкции, позволяет точно определить место расположения солнечного диска на небосводе. При плохих погодных условиях, где датчик не может обнаружить солнце из-за небесных массивов, алгоритм автоматически разворачивает солнечную панель горизонтально для увеличения площади принимаемой солнечной рассеиваемой радиации. Вторым же методом является использование уже имеющихся или рассчитанных данных, в которых практически достигнута максимальная точность линии прохождения солнца [6, 11]. Что позволяет составить алгоритм автономного движения солнечной панели на огромный период времени, где блок управления будет иметь все доступные алгоритмы для корректного ориентирования. При этом отсутствие хорошей видимости солнечного света не помешает, для точного следованием панели за Солнцем. Установка трекерной системы позволяет добиться увеличения выработки электроэнергии на 30 — 40 % по сравнению с солнечными электростанциями, использующими неподвижно закрепленные солнечные батареи [7].

На рисунке 2 приведена диаграмма изменения дневной генерации электроэнергии при переходе со стационарных опорных металлоконструкций для солнечных батарей на подвижные двухосевые трекерные системы. Как видно из графиков у неподвижной панели выработка выше на 40-50 %.

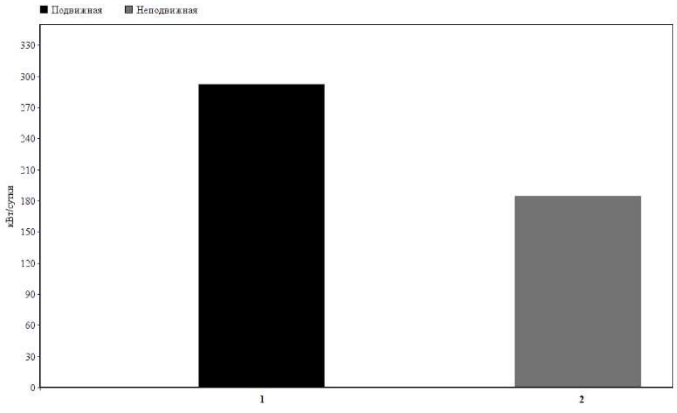


Рис.2. График соотношения вырабатываемой энергии подвижной (чёрный цвет) и неподвижной (серый цвет) фотоэлектрической панели

Несмотря на все достоинства системы отслеживания, существуют некоторые проблемы, среди которых создание крепкой платформы, способной выдержать вес панелей, повышение

устойчивости при сильных порывах ветра, а также создание механизма поворота тяжелой платформы с высокой парусностью [9]. Большие солнечные батареи из-за повышенной парусности подвержены деформации, что приводит к изменению угла падения, а значит к ухудшению генерации электроэнергии. В крайних случаях к поломке платформы.

Для повышения устойчивости солнечной панели к сильным порывам ветра предлагается поместить опору по четырем углам каркаса (рисунок 3). Каждая из которых будет иметь возможность подниматься и опускаться. При умной, взаимной системе ориентирования, опоры будут располагать панель под нужным углом по отношению к солнечному свету, а именно под углом 90 градусов.

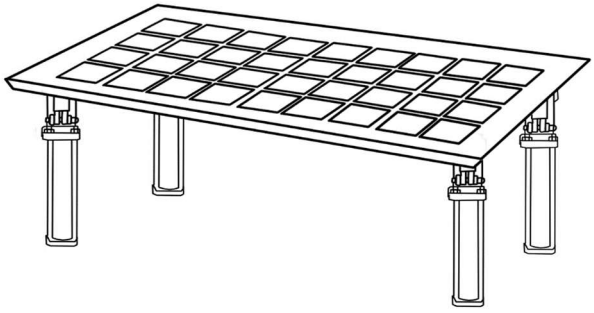


Рис. 3. Платформа для ориентации фотоэлектрической панели на направление светового потока (домкратного типа)

При большей массе платформы, можно увеличить количество опор. Таким образом, достигается максимальная надежность, что обезопасит платформу от деформаций и выхода из строя.

Проведем анализ мощностных потерь солнечной батареи, теоретические результаты при повороте панели на определенный угол приведены в таблице 2.

Приблизительное количество потерь вырабатываемой мощности солнечной панели в летний период времени сильно зависит от угла установки рабочей поверхности (табл. 2).

Таблица 2. *Оптимальные углы наклона солнечных батарей для различных широт*

Градус отклонения	Потери
10 °	2 %
20 °	7 %
30 °	15 %
40 °	25 %
45 °	30 %

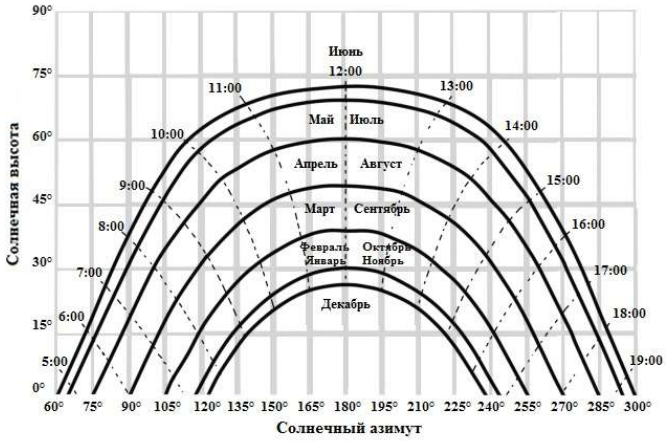


Рис. 4. Платформа для ориентации фотоэлектрической панели на направление светового потока (домкратного типа)

На рисунке 4 показана траектория Солнца и указана работающая площадь поверхности фотоэлектрического модуля на протяжении года.

Расчет будет проводиться с учетом лучших показаний, которые можно получить от установки только в летний период времени. Работа солнечной панели в летний сезон составляет от 8 до 10 часов, возьмем 9 часов как за среднюю величину. Пусть установка будет ориентирована под оптимальным углом относительно широты своего места расположения, максимальная вырабатываемая мощность 300 Вт [9]. Проводится расчет солнечной панели в статическом положении, рабочий угол падения составляет 90°.

Вычисляемое время работы 5 часов. Полученные результаты запишем в таблицу 3.

Таблица 3. *Оптимальные углы наклона солнечных батарей для различных широт*

Градус отклонения	Потери мощности, Вт	Потери мощности, (%)	Мощность, Вт	Средняя мощность, Вт
0 °	0	0	300	247,5
10 °	15	5	285	
20 °	30	10	270	
30 °	60	20	240	
40 °	90	30	210	
45 °	120	40	180	

Как видно из таблицы 4 экспериментальные значения падения мощности значительно отличаются от теоретических, а реальная мощность ниже теоретической. Как видно средняя мощность упала на 52,5 Вт или 17,5 %.

С учетом постоянного движения Солнца по небосводу и с учетом постоянных отклонений в зимний период от нормали среднегодовая выработка электрической энергии фотоэлектрической батареей падает более чем на 40 %.

Выводы

Как видно из представленных исследований использование трековой системы значительно влияет на характеристики фотоэлектрических батарей. При установки трековой системы слежения можно значительно поднять выработку электрической энергии

Домкратная система ориентации значительна проще в конструкторской реализации, чем вращающиеся трековые системы ориентации, что уменьшает её стоимость и сокращает срок окупаемости.

Полученные данные показывают значительное увеличение генерирующих характеристик солнечных электрических батарей и повышение эффективности работы всей установки. С учётом среднегодового показателя генерация электрической энергии поднимется на 40%.

Список литературы

1. Кувшинов В.В. Использование термо-фотоэлектрических установок для обеспечения тепловой и электрической энергией Севастополя / Е.Г. Какушина, А.Д. Васильев, А.А. Горецкий // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 51-57.
2. Кувшинов В.В. Возможности повышения мощностных характеристик солнечных установок при выработке тепловой и электрической энергии с одной приемной поверхности / Е.Г. Какушина // Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 3. С. 45-50.
3. Кувшинов В.В. Использование солнечных электростанций для обеспечения энергетической безопасности Крымского региона. / Ф. М. Аль-Руфаи и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 252–255.
4. Кувшинов В.В. Исследование сезонной работы промышленного фотоэлектрического модуля PS 250 / Е.Г. Какушина, Д.Д. Смирнова // Энергетические установки и технологии – 2017. Т. 3. № 1. С. 47-50.
5. Кувшинов В.В. Система хранения для солнечных станций. /Коломийченко В.П., Какушина Е.Г. и другие// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 3, С. 153–158.
6. Кувшинов В.В. Исследование характеристик фотоэлектрической решетки с изменением поверхностной освещенности решетки. / АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г., Крит, Б. Л., Морозова, Н. В., Кувшинова В. В.// Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 223–228.
7. Вологдин С.В. Анализ различных сценариев энергоснабжения Крыма с учетом режимов работы солнечной электростанции. /Якимович Б.А., Кувшинов В.В., АбдАли Л. М., Какушина, Е. Г. и другие // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том 55, № 4, С. 229–234.
8. Кувшинов В.В. 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.
9. Гурьев В.В. Совершенствование методов прогнозирования генерирующих мощностей солнечных электростанций: на примере энергосистем Республики Крым и города Севастополя. /Якимович Б.А., Абд Али Л.М. и др. // Appl. Sol. Энергия, 2019, Том. 55, №. 4, С. 242–246
10. 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.
11. Крит Б.Л. Изменение энергетических характеристик фотоэлектрических элементов путем модификации нанокластеров серебра приемной поверхности. / Федотикова М.В., Слепцов В.В., Кукушкин Д.Ю., Горожеев, М.Ю. Кувшинов В.В., Морозова Н.В.// Journal of Physics: Conference Series 1396(1),012024
12. Какушина Е.Г. Технико-экономический анализ эффективности ветро-солнечных установок на основе теории сложности. /Соломенникова С.И., Якимович Б.А.// В книге: Системы контроля окружающей среды - 2019 Тезисы докладов Международной научно-технической конференции. 2019. С. 74.

References

1. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic installations to provide thermal and electric energy to Sevastopol/ E.G. Kakushina, A.D. Vasiliev, A.A. Goretsky // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 51-57.
2. Kuvshinov V.V. Possibilities of increasing the power characteristics of solar installations in the generation of heat and electric energy from one receiving surface / E.G. Kakushina // Power plants and technologies - 2016. V. 2. No. 3. P. 45-50.
3. Kuvshinov V.V. The use of solar power plants to ensure energy security of the Crimean region. / F.M.

Al-Rufai and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, S. 252–255.
4. Kuvshinov V.V. Study of the seasonal operation of the industrial photovoltaic module PS 250 / E.G. Kakushina, D.D. Smirnova // Power plants and technologies - 2017. T. 3. No. 1. P. 47-50.
5. Kuvshinov V.V. Storage system for solar stations. / Kolomiychenko V.P., Kakushina E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 3, pp. 153–158.
6. Kuvshinov V.V. Study of the characteristics of the photoelectric grating with a change in the surface illumination of the grating. / AbdAli L. M., Kakushina, E. G., Crete, B. L., Morozova, N.V., Kuvshinova V.V.// Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, S. 223–228.
7. Vologdin S.V. Analysis of various scenarios of Crimea's energy supply, taking into account the operating modes of the solar power station. / Yakimovich B.A., Kuvshinov V.V., AbdAli L.M., Kakushina, E.G. and others // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume 55, No. 4, pp. 229–234.
8. 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.
9. Guriev V.V. Improvement of forecasting methods for generating capacities of solar power plants: on the example of power systems of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol. / Yakimovich B.A., Abd Ali L.M. et al. // Appl. Sol. Energy, 2019, Volume. 55, no. 4, S. 242–246
10. Zaichenko V.M. Directions of energy development. / Chernyavsky A.A., Kuvshinov V.V., Kakushina E.G., Abeydulin S.A.// Power plants and technologies. 2019 - T. 5. No. 3. P. 53-61.
11. Crete B.L. Changing the energy characteristics of photovoltaic cells by modifying the receiving silver nanoclusters. / Fedotikova M.V., Sleptsov V.V., KuKushkin D.Yu., Gorozheev, M.Yu. Kuvshinov V.V., Morozova N.V. // Journal of Physics: Conference Se-ries 1396 (1), 012024
12. Kakushina EG Feasibility study of the efficiency of wind-solar installations based on the theory of complexity. / Solomennikova S.I., Yakimovich B.A. // In the book: Environmental Monitoring Systems - 2019 Abstracts of the International Scientific and Technical Conference. 2019.S. 74.

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 621.316

Релейная защита электрических машин в энергетических системах и комплексах

Ю.И. Рясков[1], Н.М. Шайтор[2], А.В. Горпинченко[3]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская,33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]rjaskoff@mail.ru, [2]shaytor1950@mail.ru, [3]AVGorpinchenko@sevsu.ru

Статья поступила 05.02.2020 г.; после доработки 07.02.2020 г.

Аннотация

Рассмотрены неисправности асинхронных электрических двигателей, активно применяющиеся в промышленном электроприводе. Дан обзор применения релейной защиты асинхронных двигателей для предотвращения их неисправностей, при аварийных режимах.

Ключевые слова: неисправности асинхронных двигателей, витковое замыкание, фазовое замыкание, минимальная защита, максимальная защита, микроэлектронная защита, микропроцессорная защита.

Relay protection of electric machines in power systems and complexes

Y.I. Rjaskov[1], N.M. Shaytor[2], A.V. Gorpinchenko[3]

Sevastopol State University,33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia. [1]rjaskoff@mail.ru, [2]shaytor1950@ mail.ru, [3]AVGorpinchenko@sevsu.ru

Received 05.02.2020 y.; received in final form 07.02.2020 y.

Abstract

Faults of asynchronous electric motors widely used in industrial electric drive are considered. The review of application of relay protection of asynchronous motors for their preservation at occurrence of emergency modes is given.

Keywords: asynchronous motor malfunctions, winding closure, phase closure, minimum protection, maximum protection, microelectronic protection, microprocessor protection.

Введение

Электрические машины нашли широкое применение в промышленности и энергетике. Значительную часть среди них занимают асинхронные двигатели (АД), которые давно и прочно заняли лидирующие позиции среди силовых агрегатов различного типа оборудования. Вместе с тем они обладают и относительно высокой повреждаемостью - ежегодно около 25 % от общего числа установленных электродвигателей. Убытки от отказов АД включают в себя производственные потери, потери сырья, ремонт производственного оборудования, некачественное производство и задержки поставки, убытки от простоя и брака [1,2].

АД обычно рассчитаны на срок службы 15 - 20 лет без капитального ремонта, при условии их правильной эксплуатации. Однако в реальных условиях имеет место плохое качество питающего напряжения и нарушение правил технической эксплуатации: технологические перегрузки, условия окружающей среды (повышенные влажность, температура), снижение сопротивления изоляции, нарушение режимов охла-

ждения. Наиболее часто встречающимися неисправностями в асинхронных двигателях являются: перегрузка или перегрев статора электродвигателя — 31%; межвитковое замыкание — 15%; прочие виды неисправностей — 54% [3,4].

В частности, при обрыве одной фазы сети во время работы АД при нагрузке не более 50% номинальной, двигатель продолжает работать с увеличенным потреблением энергии с незначительным снижением скорости. При нагрузке более 50% номинальной, двигатель останавливается, и при отсутствии надлежащей защиты его обмотка выйдет из строя. После остановки такой двигатель не запускается даже на холостом ходу, так как вместо вращающегося магнитного поля трех фаз появляется пульсирующее магнитное поле двух фаз.

При соединении обмоток статора звездой внутренний обрыв одной фазы дает такие же результаты, как при обрыве одной фазы питающей сети. При соединении обмоток треугольником, обмотки двух исправных фаз окажутся подключенными к сети по схеме открытого треугольника. Создается вращающееся магнитное поле, и двигатель запускается, развивая нормальную скорость. Во время работы под нагрузкой двигатель потребляет из сети повышенный ток, а две оставшиеся в работе фазы статора перегреваются. Часто обмотка двигателя полностью выходит из строя при длительной работе двигателя по схеме открытого треугольника [5,6].

При витковом замыкании двигатель сильно гудит, величина тока во всех фазах неодинакова, при нагрузке двигателя ротор вращается с пониженной скоростью. Через некоторое время после возникновения виткового замыкания двигатель дымит, появляется характерный запах горящей изоляции.

Высокая повреждаемость обмоток электрических машин объясняется не только тяжелыми условиями их работы, но и недостаточной стабильностью электрических свойств изоляционных материалов, несовершенной технологией укладки всыпных обмоток, которые приобретают качество дефектной неремонтируемой структуры с отложенной аварийностью.

В результате повреждения изоляции может произойти замыкание между обмоткой и магнитопроводом, замыкание между витками катушек или между фазными обмотками.

Основной причиной повреждения изоляции является резкое снижение электрической прочности под влиянием увлажнения обмотки, загрязнения поверхности обмотки, попадания в электродвигатель металлической стружки, токопроводящей пыли, наличия в охлаждающем воздухе паров агрессивных жидкостей, продолжительной работы электродвигателя при повышенной температуре обмотки, естественного старения изоляции [7,8].

Виды защит трехфазных асинхронных двигателей

Устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики служат для предупреждения неисправностей электродвигателей путем ликвидации аварийных и анормальных режимов работы при их эксплуатации. Наиболее тяжелые повреждения связаны с возникновением коротких замыканий (КЗ), которые сопровождаются электрической дугой и выгоранием изоляционных материалов.

К аварийным режимам двигателей относятся: многофазные (трех- и двухфазные) КЗ в обмотках, в выводной коробке или соединительном кабеле; однофазные замыкания на землю в сетях с глухозаземленной нейтралью; витковые замыкания в обмотках.

Защиты при аварийных режимах должны действовать селективно, иметь высокое быстродействие, обладать необходимой чувствительностью и надежностью. Защиты от анормальных режимов должны обладать теми же качествами, но, как правило, не требуют высокого быстродействия.

Они действуют на срабатывание предупреждающей сигнализации, а отключение производится только при возникновении опасности повреждения оборудования.

Для электродвигателей напряжением до 1000 В применяются следующие виды защит: мгновенная релейная защита (РЗ); РЗ от междуфазных КЗ, РЗ от перегрузки, РЗ минимального напряжения. Защита от КЗ отключает двигатель при появлении в его силовой (главной) цепи или в цепи управления токов короткого замыкания. В качестве аппаратов защиты используют плавкие предохранители, электромагнитные реле, автоматические выключатели с электромагнитным расцепителем [9].

Схема включения с помощью магнитного пускателя и защиты предохранителями показана на рис 1а.

При понижении напряжения питающей сети якорь контактора YA1 отпадает, и электродвигатель отключается, чем осуществляется защита минимального напряжения. После восстановле-

ния напряжения магнитный пускатель сам включиться не может - включение его должно вновь осуществляться вручную.

Для более точного срабатывания защиты асинхронных двигателей применяются схемы защиты с реле, которые позволяют учесть токи пуска и торможения и не реагируют на них (рис. 1b). Срабатывание максимального реле тока КА приводит к выключению магнитного пускателя и обесточиванию двигателя. Защита асинхронных двигателей также осуществляется автоматическими выключателями SQ. Они могут выполнять функции выключателя, контактора, максимального токового или теплового реле, могут содержать независимый или нулевой расцепитель. В сравнении с плавкими вставками они более точны, надежны и безопасны в работе [10].

Защиты от КЗ на вторичных реле косвенного действия имеют более высокую чувствительность, чем автоматические выключатели. Защита от междуфазных КЗ для электродвигателей мощностью до 5 МВт выполняется токовой отсечкой без выдержки времени (рис. 1c). Токовое реле КА1 включается через дополнительные трансформаторы тока в цепи статорных обмоток электродвигателя и воздействует на отключающий контактор КА2.

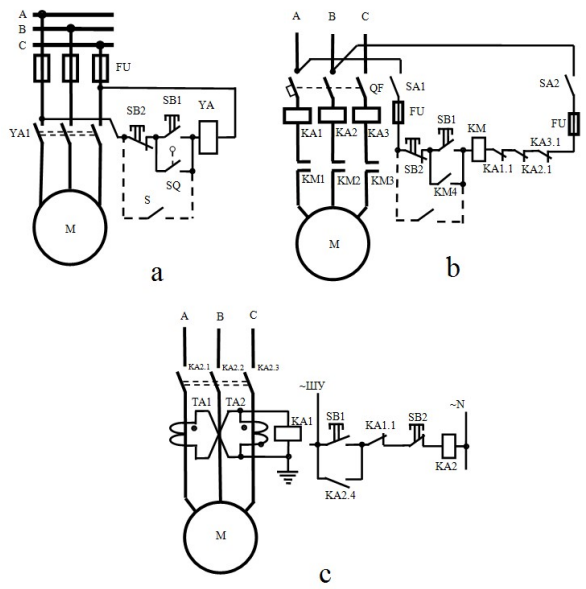


Рис.1. Схемы защит асинхронных двигателей:
a – минимальная по напряжению; b - максимальная по току; c - однорелейная от междуфазных коротких замыканий.

Для защиты большинства двигателей 0,4 кВ целесообразно применять двухрелейную схему “неполная звезда”, рис. 2a.

На рис. 2b приведена схема релейной защиты электродвигателя от междуфазных и однофазных КЗ и перегрузки. Токовая отсечка от междуфазных (реле КА2, КА4) и защита от однофазных КЗ (реле КА1) действуют без выдержки времени на отключение выключателя Q (независимый расцепитель YAT). Реле КА1 включено в схему фильтра тока нулевой последовательности и реагирует на однофазные замыкания на землю. Защита от перегрузки (реле КА3) действует с выдержкой времени на отключение электродвигателя или на срабатывание сигнализации.

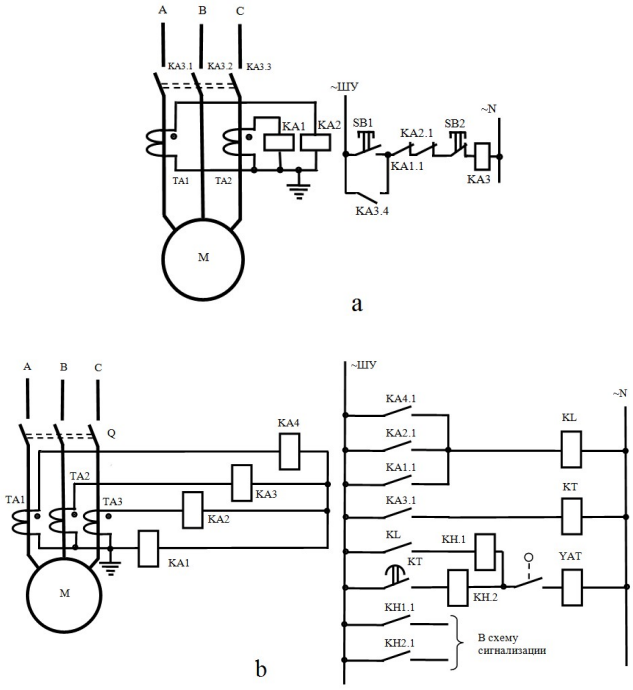


Рис.2. Схемы защит от коротких замыканий:
a – двухрелейная от междуфазных замыканий;
b - от однофазных и междуфазных замыканий и перегрузки

В отличие от токовой отсечки, защита от однофазных КЗ не требует отстройки от пускового тока электродвигателя. Поэтому применение такой защиты обеспечивает более высокую чувствительность при однофазных КЗ, чем токовая отсечка. На рис. 3a приведена схема релейной защиты электродвигателя от однофазных КЗ с токовым реле КА.

На рис. 3b представлена схема защиты от перегрузки с тепловым реле КК. Реле настраивается так, чтобы его уставка срабатывания соответствовала теплу, выделение которого соответствует предельно допустимой температуре для применяемого класса изоляции электродвигателя. Для защиты от перегрузки чаще применяют

максимальные токовые защиты с использованием токовых реле. Преимуществами токовых защит являются более простая эксплуатация, подбор и регулировка характеристик защиты [11,12].

Такую защиту выполняют одним токовым реле КА1, включенным на один из фазных токов (рис. 3 c), или по двухфазной однорелейной схеме, когда по этой же схеме выполнена защита от междуфазных КЗ (рис. 3d).

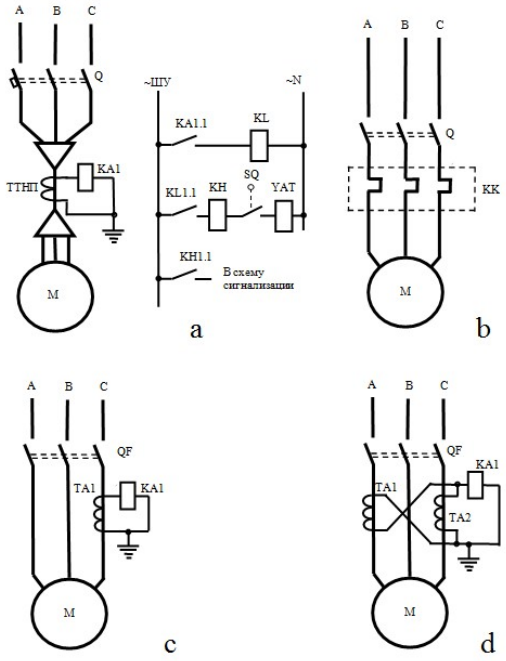


Рис.3. Схемы защит от коротких замыканий и перегрузки: a – релейная от однофазных замыканий; b – тепловая от перегрузки; c - однофазная от перегрузки; d – двухфазная от перегрузки.

При недостаточной чувствительности, селективности или низком быстродействии защит применяют микроэлектронные и микропроцессорные защиты [13,14]. Микропроцессорные защиты обладают многофункциональностью, высокой чувствительностью, более стабильными и точными характеристиками, позволяют более полно использовать перегрузочные характеристики защищаемого двигателя, выполняют функцию ранней диагностики развития аварий, имеют функцию самодиагностики. Логическая селективность позволяет с минимальной выдержкой времени отключить ток КЗ, что обеспечивает минимальный термический износ изоляции при аварийных режимах. Вместе с тем они не защищают двигатель от межвитковых замыканий статорных обмоток, так как отсутствуют проверенные устройства и способы эффективной диагностики неисправности подобного рода. Кроме того, эти защиты являются уязвимыми, поэтому для обеспечения надёжности их целесообразно использовать совместно с релейными защитами [15,16].

Выводы

На основании анализа материалов, посвященных вопросам защиты электрических машин (минимальная защита по напряжению, максимальная защита по току, однорелейная и двухрелейная защита от междуфазных коротких замыканий, защита от однофазных и междуфазных замыканий и перегрузки, релейная защита от однофазных замыканий, тепловая защита от перегрузки, однофазная и двухфазная защита от перегрузки, микроэлектронные и микропроцессорные защиты) вытекает следующее: создание и внедрение релейных защит, представленных в статье, использующихся в настоящее время, имеют ряд недостатков из-за сложности конструкций и недостаточной чувствительности к замыканиям между витками одной фазы статора. Поэтому необходимы дальнейшие исследования в области создания защиты от витковых замыканий, устраняющие эти недостатки.

Список литературы

1. Воробьев А.Э., Фатьянов С.О. Анализ причин отказов в работе асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве и в промышленном производстве // Вестник Совета молодых ученых Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2017. № 2 (5). С. 169-174.
2. Браун М., Раутани Д., Пэтил Д. Электрические цепи и электротехнические устройства. Диагностика неисправностей. Саратов, 2017. 327 с.
3. Беляев П.В., Головский А.П. Анализ методов обнаружения неисправностей на работающих асинхронных двигателях // Современные проблемы электроэнергетики и пути их решения: материалы III Всероссийской научно-технической конференции. Дагестанский государственный технический университет. Махачкала, 2018. С. 38-41.
4. Мугалинов Р.Г., Мугалинова А.Р., Калугин Ю.А., Одинцов К.Э. Методика диагностики и идентификации неисправностей обмоток асинхронного двигателя в режиме его функционирования // Электротехнические системы и комплексы. 2018. № 3 (40). С. 70-78.

5. Привалов Е.Е. Диагностика асинхронных двигателей электроэнергетического оборудования. Москва, 2015. 70 с.
6. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А. Диагностика неисправностей обмотки статора асинхронных двигателей // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина. 2015. Т. 1. С. 139-146.
7. Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair: second edition. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley, 2014, 672 p. DOI: 10.1109/MEI.2004.1307097.
8. Guedesa.S., Sovas.M. Insulation protection and online stress agent identification for electric machines using artificial intelligence // Electric Power Applications. 2019. Т. 13. №4, pp. 559-570.
9. Gazyrin V.E., Osintsev A.A., Librinov L.L., Frobva E.I. Verification of distance relay of relay protection and emergency control automation equipment in asynchronous mode by standard devices of the retom test complex // Power Technology and Engineering. 2018. Т. 52. № 2, pp. 242-247.
10. Волобуев С.В. Технико-экономическая оценка повышения эффективности защиты асинхронных двигателей от ненормальных режимов работы тепловыми реле // В сборнике: Эколого-мелиоративные аспекты рационального природопользования. Материалы Международной научно-практической конференции. 2017. С. 234-238.
11. Волобуев С. В. Повышение эффективности защиты асинхронных двигателей при их работе на пониженном напряжении тепловыми реле // В сборнике: Мировые научно-технологические тенденции социально-экономического развития АПК и сельских территорий Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 75-летию окончания Сталинградской битвы. 2018. С. 485-490.
12. Брейдо И.В., Сенькина И.Ю., Нурнаганбетова Г.С. Способ косвенной защиты от перегрева для электроприводов горношахтных установок // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2018. Т.329. № 2. С. 65-73.
13. Анисинов К.В., Попов А.Е. Сравнение аналоговой и микропроцессорной релейных защит // В сборнике: Ключевые проблемы и передовые разработки в современной науке. Сборник научных трудов по материалам I Международной научно-практической конференции. 2017. С. 107-111.
14. Захаров О.Г. Надежность цифровых устройств релейной защиты. Показатели. Требования. Оценки: монография. Москва, 2014. 128 с. ISBN: 978-5-9729-0073-2
15. Гуревич В.И. Уязвимости микропроцессорных реле защиты. Проблемы и решения. Москва, 2014. 256 с.
16. Типикина А.П., Певцова Л. С. Оценка программной надежности микропроцессорных релейных защит // Интернет-журнал Науковедение. 2015. Т. 7. № 2 (27). С. 121-122.

References

1. Vorobiev A. E., Fatyanov S. O. Analysis of the causes of failures in the operation of asynchronous electric motors in agriculture and in industrial production // Bulletin of the Council of young scientists of the Ryazan state agrotechnological University named after P. A. Kostychev. 2017, no 2 (5). pp. 169-174.
2. Brown M., Rawtani D., Patil D. Electric circuits and electrical devices. Fault diagnosis. Saratov, 2017. 327 p.
3. Belyaev P. V., Golovsky A. P. Analysis of methods of fault detection on working asynchronous motors. Modern problems of electric power industry and ways of their solution: materials of the III all-Russian scientific and technical conference. Dagestan state technical University. Makhachkala, 2018. pp. 38-41.
4. Mugalimov R. G., Mugalimova A. R., Kalugin.A., Odintsov K. E. Method of diagnostics and identification of faults of windings of asynchronous motor in the mode of its functioning. Electrotechnical systems and complexes. 2018, no 3 (40). pp.70-78.
5. Privalov E. E. Diagnostics of asynchronous motors of electric power equipment. Moscow, 2015. 70 p.
6. Safin N. R., Pracht V. A., Dmitrievsky V. A. Diagnostics of faults of stator winding of asynchronous motors. automation in electric power industry and electrical engineering. Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin. 2015, vol.1, pp. 139-146.
7. Greg C. Stone, Ian Culbert, Edward A. Boulter, Hussein Dhirani. Electrical insulation for rotating machines: design, evaluation, aging, testing, and repair: second edition. IEEE Press Series on Power Engineering. Wiley, 2014, p. 672. DOI: 10.1109/MEI.2004.1307097.
8. Guedesa.S., Sovas.M. Insulation protection and online stress agent identification for electric machines using artificial intelligence. Electric Power Applications. 2019, vol. 13, no 4. pp. 559-570.
9. Gazyrin V. E., Osintsev A. A., Librinov L.L., Frobva E.I. Verification of distance relay of relay protection and emergency control automation equipment in asynchronous mode by standard devices of the retom test complex./ Power Technology and Engineering. 2018. 52, no 2. pp. 242-247.
10. Volobuev S. V. Technical and economic assessment of increasing the efficiency of protection of asynchronous motors from abnormal modes of operation by thermal relays // in the collection: Ecological and

meliorative aspects of rational nature management. Materials of the International scientific and practical conference. 2017. pp. 234-238.
11. Volobuev S. V. Increase of efficiency of protection of asynchronous motors operating at a lower voltage thermal relays // In the book: the World scientific and technological trends of socio-economic development of AIC and rural territories, Materials of International scientific-practical conference dedicated to the 75th anniversary of the battle of Stalingrad. 2018. pp. 485-490.
12. Breido I.V., Sinicina I.Y., Nurmaganbetova G.S. Method indirect overheat protection for electric mining installations // proceedings of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of georesources. 2018, vol. 329, no 2. pp. 65-73.
13. Anisimov K. V., Popov A. E. Comparison of analog and microprocessor relay protection // In the book: Key issues and new developments in modern science, Collection of scientific works on materials of I International scientific-practical conference. 2017. pp. 107-111.
14. Zakharov O. G. Reliability of digital relay protection devices. Indicators. Requirements. Assessment: monograph. Moscow, 2014. 128 p. ISBN: 978-5-9729-0073-2.
15. Gurevich V. I. Vulnerabilities of microprocessor protection relays. Problems and solutions. Moscow, 2014. 256 p.
16. Tipikina P. A., Pevtsov L. S. Estimation of software reliability of microprocessor relay protection // Internet journal of the sociology of Science. 2015, vol. 7, no 2 (27), pp. 121-122.

УДК. 621.311:658

Релейная защита и автоматика – проблемы и перспективы развития в электроэнергетической системе России

В.В. Смирнов[1], Н.А. Яковенко[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]svadick@mail.ru,[2]nik777fort@yandex.ru

Статья поступила 19.02.2020 г.; после доработки 20.02.2020 г.

Аннотация
В статье рассматриваются проблемы и перспективы релейной защиты и автоматики в условиях цифровой трансформации электроэнергетического комплекса.

Ключевые слова: релейная защита, микропроцессорные терминалы, цифровая трансформация.

Relay protection and automation - problems and prospects of development in the electric power system of Russia

V.V. Smirnov [1] , N.A. Iakovenko [2],
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]svadick@mail.ru,[2]nik777fort@yandex.ru

Received 19.02.2020 y.; received in final form 20.02.2020 y.

Abstract
The article discusses the problems and prospects of relay protection and automation in the context of digital transformation of the electric power complex.

Key words: relay protection, microprocessor terminals, digital transformation.

Введение

Основной задачей устройств релейной защиты и автоматики (УРЗА) является своевременное выявление аварийных и ненормальных режимов работы электрических сетей; воздействие на приводы выключателей с целью отключения поврежденного участка сети; замыкание цепей сигнализации для оповещения персонала, управляющего режимами работы электрических сетей и обслуживающего их; при необходимости, срабатывание устройств автоматики, таких как АВР, АПВ, АРВ и др. [1]. РЗА играет ключевую роль в обеспечении стабильности электроэнергетической системы России, поэтому новации в этой области должны подвергаться подробному рассмотрению экспертов, с взвешиванием всех «за» и «против». Без давления заинтересованных в этом корпораций, готовых оправдать любые изменения с целью получения сверхприбыли.

Целью исследования является определение основных проблем с которыми сталкивается РЗА в энергетической системе России и перспективные пути развития.

Результаты исследования

Одной из таких «новаций» стала повсеместная «цифровая трансформация». Так, во исполнение указов Президента Российской Федерации Путина В.В. от 09.05.2017 № 203 «О Стратегии

развития информационного общества в Российской Федерации на 2017 - 2030 годы» и от 07.05.2018 № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года», в которых определены национальные цели и стратегические задачи развития Российской Федерации на период до 2030 года, а также распоряжения Правительства Российской Федерации от 28.07.2017 № 1632р, утверждающего программу «Цифровая экономика Российской Федерации», электроэнергетика России пошла по пути к цифровизации. В связи с этим, Минэнерго России при активном участии компаний ТЭК сформировало ведомственный проект «Цифровая энергетика», в свою очередь ОАО «Россети» утвердил Концепцию «Цифровой трансформации 2030» и «Развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса». Что это значит для РЗА?

Это предполагает переход от традиционных методов управления режимами работы устройств релейной защиты и автоматики, когда изменение эксплуатационного состояния устройств РЗА производится на месте их установки посредством коммутационных аппаратов, к дистанционному управлению, предполагающему удаленный доступ к устройствам РЗА [2]. Предпосылками организации дистанционного управления устройствами РЗА являются новые возможности микропроцессорных устройств релейной защиты и автоматики (МП УРЗА), использующих цифровые технологии, а также достижения в области организации АСУ ТП, системы сбора и передачи информации (ССПИ) и каналов связи.

Но что мы имеем на сегодня? А имеем мы то, что согласно докладу «О текущем состоянии и планах развития релейной защиты и автоматики в ДЗО ПАО «Россети» от апреля 2019 года [3], из 1 751 067 устройств РЗА находящихся в эксплуатации, лишь 15% являются микропроцессорными устройствами, из которых 1% считаются «устаревшими». Однако, стоит отметить, что это хороший прирост за последние годы, поскольку ещё недавно доля МП среди УРЗА России составляла менее 10%. Но какова статистика по ложным срабатываниям? Всё из того же документа мы имеем 58% ложных срабатываний (рис.1), приходящихся на микропроцессорные терминалы (из расчёта ложных срабатываний на 1000 шт. УРЗА). Из которых треть происходит из-за неисправности МП – 22%, и сбоя в ПО – 11%. Внутренние неисправности МП УРЗА – основная причина ложных срабатываний, об этом свидетельствует и статистика выявления неисправности при проведения технического обслуживания специалистами подразделений РЗА. Так, внутренняя причина неисправности МП УРЗА выявлена в 22,5%; неисправность датчика дуговой защиты – 1,1%; самопроизвольное изменение (уход) уставок – 0,4% из ста.

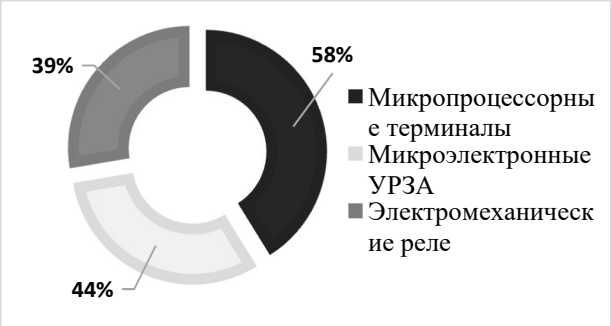


Рис.1. Распределение случаев неправильной работы РЗА на 1000 шт. УРЗА.

В чем проблема? Зачастую, отказ в работе МП УРЗА при эксплуатации, можно объяснить следующими причинами:

1. Импортные микропроцессорные терминалы в большинстве случаев предъявляют повышенные требования к параметрам контура заземления, в частности требуют низкого импульсного сопротивления этого контура. На Западе принято для таких устройств монтировать свой собственный контур заземления. В российских условиях многие отказы в функционировании таких защит связаны с наведенными в контуре заземления импульсными помехами.

2. Микропроцессорные терминалы подвержены влиянию электромагнитных помех, поступающих «из воздуха», по цепям оперативного тока, цепям напряжения и трансформаторов тока. Отмечались случаи ложного срабатывания защиты, например, при включении рядом с ней мобильного телефона.

3. Современные устройства защиты часто не могут быть удовлетворительно «состыкованы» с отечественными трансформаторами тока, которые имеют недопустимо большие для западных терминалов погрешности и в установившихся, и, особенно, в переходных режимах.

4. Часто импортные защиты не учитывают особенностей отечественной техники, в частности защищаемых объектов.

5. Сама «идеология» построения импортных устройств РЗА обычно не соответствует отечественной. В частности, на Западе практически отсутствуют такие понятия, как АЧР, САОН

(специальная автоматика отключения нагрузки), по-другому выполняется АПВ и т.д. [4].

Однако, низкая надежность МП УРЗА отмечается не только в России. В [5] приводятся данные о соотношении повреждаемости в одной неназванной компании микропроцессорных терминалов (МП-терминал) и электромеханических реле (ЭМ-реле), которое составляет 50 к 1. Условно принято, что МП-терминал выполняет функции 10 ЭМ-реле. Тогда соотношение повреждаемости МП-устройств и ЭМ-реле составит 5 к 1. Однако в России принято при расчетах [6], что один МП-терминал содержит 3 единицы устройств защиты. С учетом фактического среднего количества функций отдельных реле в МП-терминале можно считать, что соотношение повреждаемости МП-устройств и ЭМ-реле, приведенное выше характерно не только для России, но и для других стран.

Но, не стоит «бить в колокола», поскольку средний показатель правильной работы релейной защиты и автоматики находится на уровне 99,45%, для микропроцессорных УРЗА на уровне 99,2%. Этот показатель можно улучшить, если обеспечить единый подход к организации эксплуатации РЗА [7]. Из этого вытекает, что необходимо пересмотреть и согласовать применение электроэнергетическими компаниями, единых правил технического обслуживания устройств релейной защиты, автоматики, дистанционного управления и сигнализации электросетевого комплекса, а также инструкции по организации и производству работ в устройствах релейной защиты и электроавтоматики.

Также, в связи с массовым внедрением МП устройств РЗА, созданием каналов связи и увеличением объема передаваемой и принимаемой технологической информации необходимо обеспечить безопасность работы информационно-технологических систем на энергообъектах, так как они слабо защищены от возможности незаконного вмешательства в работу. А в сложившихся условиях перехода от традиционных методов управления к дистанционному управлению должна быть экономически целесообразна и обеспечена надежность работы в условиях возможных внешних деструктивных воздействий на систему управления. В настоящее время информационная защита таких систем обеспечивается разграничением прав доступа и стандартной антивирусной защитой, а этого недостаточно.

Будущее РЗА, как ни странно, будет связанно с развитием коммуникационных технологий. Что уже сегодня ведёт к необходимости создания новых принципов построения РЗА на основе широкого применения адаптивных программно-аппаратных комплексов. Также, развитие РЗА должно учитывать изменения, происходящие в электроэнергетике, а именно:

- развитие генерации малой и средней мощности и подключение этих источников в сеть;
- внедрение технологий «умных сетей» (Smart Grid), предусматривающих учет интересов всех сторон (генерация, передача и распределение электроэнергии, потребитель), включая возможность участия потребителя в выработке электроэнергии и управлении ее потреблением;
- появление устройств, работающих непосредственно вблизи от основного оборудования, в т.ч. под потенциалом рабочего напряжения;
- внедрение нового управляемого силового оборудования в активно-адаптивной сети (ААС) [8];
- внедрение цифровых ПС с учетом развития цифровой обработки данных и технологий связи [2].

Развитие РЗА распределительных сетей должно предполагать решение (на основе сформированных требований) следующих задач:

- адаптация и совершенствование известных алгоритмов с учетом специфики распределительных сетей, содержащих электростанции малой и средней мощности;
- разработка новых алгоритмов, обладающих адаптивными свойствами и построенных, в том числе с использованием возможностей современных коммуникационных технологий (цифровых каналов связи, информации от систем мониторинга переходных процессов).

Внедрение технологий Smart Grid требует изменения подхода к организации РЗА и ставит следующие задачи: - создание централизованных защит на базе высокопроизводительных вычислительных систем; - перераспределение функций РЗА между терминалами, при этом появляется гибкая возможность по переносу функций РЗА между различными устройствами [9]; - создание защит на основе новых адаптивных алгоритмов РЗА, способных к обработке большего объема информации о защищаемом энергообъекте; - создание алгоритмов защит на основе использования синхронных векторных измерений.

Применение управляемого силового оборудования и управление режимами его работы (и

соответственно всей системой) приводит к изменению условий функционирования устройств РЗА. Это обусловлено изменением параметров электромагнитных и электромеханических переходных процессов в результате работы управляемого силового оборудования ААС [10]. Для обеспечения правильного функционирования устройств РЗА в этих условиях требуется решение задачи адаптации уставок и параметров настройки устройств РЗА к текущим изменениям параметров энергосистемы в режиме реального времени. Для этого должна быть разработана модель ААС, исследованы процессы изменения характеристик энергосистемы с ААС. Кроме того, целесообразно рассмотреть варианты сегментации ААС по зонам быстродействующих защит с абсолютной селективностью и передачей отключающих и/или блокирующих сигналов.

Вывод

Перечисленные выше тренды в электроэнергетике ставят перед РЗА (в основном МП РЗА) следующие задачи:

- приведение к единым стандартам нормативных документов в сфере технического обслуживания устройств релейной защиты, автоматики, дистанционного управления и сигнализации электросетевого комплекса, а также инструкций по организации и производству работ в устройствах релейной защиты и электроавтоматики.
- сохранение и улучшение показателей надежности в условиях изменяющейся элементной базы и архитектуры;
- автоматизация проведения технического обслуживания, выполнения расчетов уставок и выбора параметров настроек;
- перераспределение функций в службах РЗА: возможность централизованного дистанционного решения сложных задач и минимизация работ на энергообъектах, требующих высокой квалификации персонала;
- использование возможностей МП устройств РЗА для систем телеметрии и телесигнализации;
- обеспечение информационной безопасности, в том числе в условиях двухстороннего информационного обмена и внедрения дистанционного мониторинга и управления РЗА.

Поэтапное решение этих задач и определит будущее РЗА в электроэнергетической системе России.

Список литературы

1. Фигурнов Е.П. Релейная защита. М.: Желдориздат, - 2002. - 720 с.
2. Концепция «Развития релейной защиты и автоматики электросетевого комплекса» / ПАО «Россети». – URL: https://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc/vipiska_prilogenie.pdf (07.02.2020г.).
3. Доклад «О текущем состоянии и планах развития релейной защиты и автоматики в ДЗО ПАО «Россети» / Кириленков В.С. – URL: http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2019/06/1.pdf (08.02.2020г.).
4. Об эффективности новых устройств РЗА / Шалин А. И. – URL: http://masters.donntu.org/2013/etf/petrov/library/article7/article7.htm (06.02.2020г.).
5. Гуревич В.И. Уязвимость микропроцессорных реле защиты: проблемы и решения. М.: Инфра-Инженерия, - 2014.
6. Кузьмичев В.А., Коновалова Е.В., Захаренков А.Ю. и др. Анализ работы микропроцессорных устройств РЗА в ЕНЭС России // Релейная защита и автоматизация. - 2014. - № 2(15).
7. Гуревич, В. И. Проблемы стандартизации в релейной защите / В. И. Гуревич. - Санкт-Петербург: Деан, 2015. - 168 с. : ил., табл.
8. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью. – URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (08.02.2020г.).
9. Гуревич В.И. Smart Grid: Западный вариант [Электронный ресурс]. – URL: http://relay-protection.ru/content/view/114/11.
10. Концепция развития и применения систем релейной защиты и автоматики для интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью [Электронный ресурс]. – URL: https://www.rosseti.ru.

References

1. Figurins E.P. Relay protection. M.: Zheldorizdat, - 2002. - 720 p.
2. Concept of "Development of relay protection and automation of electric grid complex"/PJSC "Rosseti." - URL: https://www.rosseti.ru/investment/science/tech/doc /vipiska_prilogenie.pdf (07.02.2010).
3. Report "On the Current State and Plans for the Development of Relay Protection and Automation in the DSS of PJSC" Rosseti "/Kirilenkov V.S. - URL: http://digitalsubstation.com/wp-content/uploads/2019/06/ 1.pdf (08.02.2010).
4. About efficiency of new devices of RZA / Shaline A. I. - URL: http://masters.donntu.org/2013/etf/petrov/library/article7/article7.htm (06.02.2020).
5. Gurevich V.I. Vulnerability of microprocessor protection relays: problems and solutions. M.: Infra-Engineering, - 2014.
6. Kuzmichev V.A., Konovalov E.V., Zararenkov

A.Y. et al. Analysis of RZA Microprocessor Devices Operation in the Russian ENES//Relay Protection and Automation. - 2014. - № 2 (15).
7. Gurevich, V. I. Problems of Standardization in Relay Protection/V. I. Gurevich. - St. Petersburg: Dean, 2015. - 168 p.: il., Table
8. Main provisions of the concept of smart power system with active-adaptive network. - URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf (08.02.2010).
9. Gurevich V.I. Smart Grid: Western version [Electronic resource]. - URL: http://relay-protection.ru/content/view/114/11.
10. Concept of development and application of relay protection and automation systems for intelligent electric power system with active-adaptive network [Electronic resource]. - URL: https://www.rosseti.ru.

УДК. 621.311:658

Перспективы применения провода типа «Z» в электрохозяйстве России

В.В. Смирнов[1] , Н.А. Яковенко[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]svadick@mail.ru,[2]nik777fort@yandex.ru

Статья поступила 31.01.2020 г.; после доработки 03.02.2020 г.

Аннотация
В статье рассматриваются конструктивные особенности, а также целесообразность применения провода типа «Z». Определяется специфика и преимущество данного типа провода, а также перспектива его применения.

Ключевые слова: провод типа «Z», линия электропередач, электрохозяйство.

Prospects of "Z" type wire application in the Russian electrical engineering

V.V. Smirnov [1] ,N.A. Iakovenko [2],
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]svadick@mail.ru,[2]nik777fort@yandex.ru

Received 31.01.2020 y.; received in final form 03.02.2020 y.

Abstract
The article discusses the design features as well as the feasibility of using a "Z" type wire. Specifies the specificity and advantage of this type of wire, as well as the perspective of its application.

Key words: "Z" type wire, power transmission line, electric equipment.

Введение

Ежегодный рост мирового энергопотребления в среднем на 3,5% в год интенсифицирует развитие энергетического комплекса всех стран. А поскольку основным способом передачи электроэнергии на значительные расстояния остаются воздушные линии электропередачи (ВЛЭП), то в первую очередь их затрагивают программы реконструкции и развития энергетики. Известно, что в последние годы многие регионы и города России сталкиваются с проблемой ограниченной пропускной способности ЛЭП. По данным ОАО «ФСК ЕЭС» список регионов пиковых нагрузок включает 16 областей, в числе которых Московская, Ленинградская, Нижегородская, Архангельская, Волгоградская области, Краснодарский и Пермский край, республика Коми, Карелия, Тыва, Дагестан и другие. Уже сегодня энергопотребление этих районов в несколько раз превышает величины, заложенные в Энергетической стратегии РФ до 2030 года, и потребление энергии в них постоянно растёт. Значительное увеличение спроса на электроэнергию за последние 10 лет требует постоянного расширения или обновления распределительных сетей энергоснабжающих предприятий. Этот факт побуждает крупнейшие электросетевые компании нашей страны к широкому внедрению инноваций во всех сферах деятельности.

Целью исследования является рассмотрение возможности и экономической целесообразности применения провода типа «Z» при строительстве и реконструкции высоковольтных ЛЭП.

Исторический экскурс

В конце 1980-х годов бельгийские компании столкнулись с нарастающим противодействием сооружению новых высоковольтных линий, как со стороны населения, так и со стороны администраций различного уровня.

А также некоторыми другими проблемами, такими как:

- необходимость увеличения пропускной способности существующих линий;
- снижение механических нагрузок, прикладываемых к опорам ЛЭП, из-за пляски проводов;
- повышение коррозионной стойкости проводов и тросов;
- снижение риска обрыва провода при частичном повреждении нескольких внешних проволок из-за внешних воздействий, в том числе в результате удара молнии;
- улучшенные механические свойства проводов при налипании снега или образовании льда.

Эта ситуация привела к необходимости поиска новых решений, как удовлетворить растущие потребности в электроэнергии без систематического рассмотрения проблемы строительства новых линий. Для достижения этой цели концерном Nexans был разработан компактный провод Aero-Z нового типа, учитывающий опыт эксплуатации компактных проводов предыдущего поколения.

В настоящее время в Бельгии смонтировано более 2000 км такого провода на напряжения 63–400 кВ. Начиная с 1995 г. в Бельгии все строящиеся или реконструируемые линии электропередачи оснащаются проводом Aero-Z. Во Франции в ближайшие 10 лет также намечено осуществить переход на данный вид провода, монтируя примерно 1500 км/год. В Южной Америке построено более 1200 км таких линий и планируется монтаж еще 1500 км.

Конструкционные особенности и преимущества провода типа «Z»

Основная особенность провода «Z» заключается в форме проволок верхних токопроводящих слоев – их сечение напоминает букву «Z» (рис.1).

Внутренняя часть провода аналогична обычному проводу типа АС за исключением того, что внутренние проводники могут быть изготовлены не только из стали, но и из алюминия или алюминиевых сплавов. Более того, один или несколько проводников могут быть полыми и содержать внутри оптические волокна. Внешние же слои провода выполняются из алюминиевых проводников, имеющих форму буквы "Z", причем проводники очень плотно прилегают друг к другу.

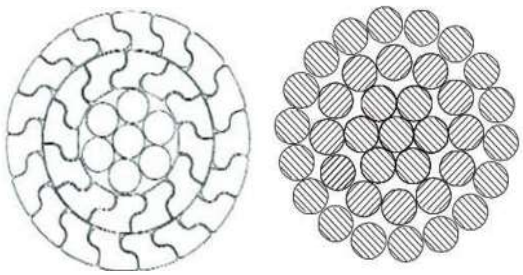


Рис.1. Поперечное сечение провода типа Z (слева) и провода АС (справа).

Провода типа «Z», исходя из конструкционных особенностей, получили следующие отличительные характеристики:

1.*Увеличение передаваемой мощности* по сравнению с проводами стандартной конструкции:

- снижение потерь на 13-14% при одинаковой передаваемой мощности;
- увеличение передаваемой мощности при той же величине потерь

2.*Коррозия:* Большая контактная поверхность между двумя Z-образными проволоками одного слоя обеспечивает эффективную защиту от просачивания консистентной смазки изнутри провода. Так как внутреннее строение провода очень плотное, то влага туда практически не проникает. А соответственно не будет подвергаться коррозии и разрушаться стальной сердечник.

3. *Деформационная способность:* Даже при обрыве проволоки внешнего слоя провод такого типа остается на месте под действием механических рабочих напряжений. Данное свойство сохраняется до тех пор, пока не происходит обрыв пяти смежных проволок

4. *Снижение пляски проводов:* Aero-Z провод меньше подвержен вибрациям при ветровых нагрузках, это было определено при исследовании траектории перемещения провода в вертикальной плоскости (опытное испытание на проводе проводилось в середине пролета 600 м при турбулентном ветре 30-40 м/с на высоте 10 м).

А также, аэродинамическое сопротивление у провода типа Z на треть меньше, чем у АС. Проще говоря, провода Z-образного профиля лучше обдуваются ветром, а значит и опоры не испытывают больших ветровых нагрузок, и вибрация на 50% меньше.

5. *Снижение нагрузки на опоры:* В процессе эксплуатации Z-провода такой конструкции меньше провисают. Из опытных испытаний по изменения усилия, прикладываемого к опоре ВЛ

при турбулентном ветре 175 км/ч на высоте 10, было определено, что напряжение на опору снижается на 17%. Соответственно можно увеличивать габаритные пролеты и уменьшать общее количество опор. Нагрузка на них будет меньше.

6. *Минимальное обледенение и налипание снега:* На простых алюминиевых или сталеалюминевых проводах А или АС, при налипании снега происходит смещение центра тяжести. В итоге провод в пролете начинает скручиваться, зачастую против повивов своих жил. Что приводит к их расплетению. Провода Z-формы данному явлению сопротивляются и сбрасывают излишки снега. Лед на них преимущественно образуется только с одной стороны. И по мере увеличения нароста, просто отваливается под собственным весом.

Экономическая эффективность применения провода типа «Z»

Главный недостаток провода типа «Z» – высокая стоимость. Рассмотрим этот недостаток на примере экономической реализации (основной расчет будем производить в Евро):

Исходные данные:

- Напряжение линии 220кВ
- Длина линии: 30 км
- Фактор нагрузки: 75 %
- Количество часов работы ВЛ в году 5700
- Средняя стоимость кВт/ч - 2,6 Рублей (0,0333 Евро).

При одинаковой передаваемой мощности АС и Aero-Z

Таблица 1. *Экономическая реализация.*

	АС	Aero-Z
Тепловые потери	23,278 ГВт/час	20,068 ГВт/час
Ежегодная прибыль		
- в ГВт/час	3,210	
- в млн. руб.	8,346 (105,9 тыс.евро)	

Для двухцепной линии 330 кВ длиной 30 км имеем:

Предполагаемая стоимость монтажа ВЛ

- Опоры и арматура: 23,4 млн.Евро
- Провод: 5,4 млн. Евро
- Проект, монтаж, надзор и т.д.: 7,2 млн.Евро

Итого: 36 млн.Евро

Однако, с учетом меньшего веса и лучших механических характеристик проводов AERO-Z, можно увеличить на 8-10 % длину пролета, сократив число опор. Это даст экономию 1,9 млн. Евро.

Но провод Aero-Z дороже обычного провода АС на 0,25 млн. Евро. С учетом меньших потерь в проводе эта разница окупается примерно за 5 лет, а за 10-12 лет окупаются все затраты на строительство и эксплуатацию данной ВЛ.

Опыт реализации проектов в России с использованием проводов типа «Z»

В 2007 году ОАО «Кубаньэнерго» выполнило реконструкцию ВЛ-110 кВ «Шепси - Туапсе (тяговая)» (протяженностью 10,3 км) с заменой провода АС на провод марки Aero-Z. В результате реконструкции увеличена пропускная способность ВЛ с 64 МВА (337 А для медного провода М-70), до 113 МВА (596 А), для провода Aero-Z 242-2Z.

ОАО «Кубаньэнерго»: *«За время эксплуатации в условиях сильных ветровых нагрузок, высоких температур и повышенной грозовой активности повреждений проводов нового поколения не зафиксировано. При отрицательных температурах с выпадением осадков снегоналипания на данных проводах не наблюдалось, в то время как на параллельно следующих ВЛ с применением провода марки АС наблюдалось снегоналипание»*. Положительный опыт эксплуатации таких проводов получен в Краснодарском крае, в Крыму, в Хабаровском крае, Амурской области и на Сахалине – зонах, где сложные климатические условия становятся причиной частых повреждений на ЛЭП с поводами устаревших конструкций (табл.2).

На сегодняшний день, открыты заводы групп компаний ооо «нексанс» и ооо «сим-россламифил» по производству проводов нового поколения в россии в г.углич. В связи с этим, стоимость проводов на российском рынке заметно снизилась.

Таблица 2. *Примеры реализации проектов в России*.

№	Название проекта	Провод, количество	Регион	Заказчик	Срок реализации	Исполнитель проекта
1	Строительство ВЛ 110 кВ Шепси – Туапсе тяговая	AERO-Z AAAC 242-2Z, 77 км	Краснодарский край	ОАО «Кубаньэнерго»	2007	Группа компаний «Сим-Росс»
2	Строительство ВЛ 110 кВ Южно- Сахалинск - ПС Южное	AERO-Z AAAC 261-2Z, 36 км	о.Сахалин	ОАО «Сахалинэнерго»	2007	Филиал «Сим-Росс» в г. Южно-Сахалинск
3	Строительство ВЛ 110 кВ Перевальная-Алушта	AERO-Z AAAC 242-2Z, 55 км	Украина, Крым	ОАО «Крымэнерго»	2007 – 2008	Группа компаний «Сим-Росс»
4	Переход через Амур, ВЛ 220 кВ	AERO-Z AACSR 649b-2Z, 27 км	Амурская область	МЭС Востока, филиал ФСК	2008	Филиал «Сим-Росс» в г. Южно-Сахалинск
5	Реконструкция ВЛ 110 кВ «ПК31, ПК3-2» г. Тольятти	AERO-Z 366-2Z, 19 км	Тольятти	МРСК Волги	2009	НПК «Сим-Росс»
6	Строительство ПС 110 кВ «Вишневая»	LAMIFIL AACSRZ 251, 4,5 км	Сочи	МРСК Юга	2010	Группа компаний «Сим-Росс»
7	Реконструкция ВЛ 110 кВ Сочинская ТЭС - Краснополянская ГЭС	LAMIFIL AACSRZ 251 и 339, 113 км	Сочи	ОАО «Кубаньэнерго»	2011	Группа компаний «Сим-Росс»
8	Реконструкция ВЛ 500 кВ Зейская ГЭС – Амурская	LAMIFIL AACSRZ 647, 13,8 км	Амурская область	МЭС Востока, филиал ФСК	2013	Группа компаний «Сим-Росс»
9	Реконструкция ВЛ 220 кВ Комсомольская-Селихино-Ванино	LAMIFIL AACSRZ 647, 10 км	Хабаровский край	МЭС Востока, филиал ФСК	2013	Группа компаний «Сим-Росс»
10	Реконструкция ВЛ 220 кВ Макаров – Ильинск	LAMIFIL AAAC 301-2Z, 78 км	Сахалинская область	МЭС Востока, филиал ФСК	2013	Группа компаний «Сим-Росс»
11	Реконструкция ВЛ 110 кВ Кубань - Казанская	LAMIFIL AACSRZ 251, 10 км	Красноярский край	ОАО «Кубаньэнерго»	2013	Группа компаний «Сим-Росс»

Вывод

Использование провода нового поколения типа «z», позволяет:

- Увеличить пропускную способность ВЛ в 1,5 - 2 раза;
- Достичь экономии за счет дополнительной передаваемой мощности 150 - 250 млн руб. на линию в год;
- Снизить потери при передачи электроэнергии до 30%;
- Достичь экономии за счет более низких потерь до 98 тыс. руб. на 1 км линии в год;
- Снизить вероятность обрыва проводов при воздействии внешних механических нагрузок (противодействие налипанию снега и гололедообразованию);
- Уменьшить нагрузку на поддерживающие устройства ЛЭП, что приведёт к возможному увеличению длин пролетов и экономии до 10 % числа опор.

Таким образом, провода типа «z» имеют целый ряд особенностей и достоинств, за счет которых он являются наиболее перспективным при модернизации линий электропередач россии.

Список литературы

1. Couneson P., Lamsoul J., Delplanque D., Capelle T., Havaux M., Guery D., Delree X.: Улучшение рабочих характеристик имеющихся высоковольтных ЛЭП с помощью полностью замкнутых и заземляющих проводов. Отчет СИГРЭ 22209; Париж, 1998.
2. Olivary D., Hauchart J.-L. – Исследование аэродинамического обдува электрических кабелей со слабой шероховатостью поверхности – Институт динамики жидкости фон Кармана – Ватерлоо, 72 B-1640 Род-Сен-Женезе – БельгияРеф.ЭАР 8710/DO-JLM/nt.
3. Gaudry M., Chore F., Hardy C., Ghannoum E. – Увеличение токовой нагрузки воздушных линий с использованием однородных компактных проводников. – СИГРЭ 1998 – 22-201.
4. Куликов А.С. Aero-Z – высокотехнологичные провода для высоковольтных линий электропередач // Третья Российская с международным участием научно-практическая конференция «ЛЭП 2008» (5-8 июня 2008 г.) /Новосибирск, 2008.– С.97.
5. Департамент технического развития ОАО «МРСК Центра». Обзор новых технологий в энергетике / Департамент технического развития ОАО «МРСК Центра» // Обзор новых технологий в энергетике. -2008. - №1.
6. Колосов С. В. Повышение пропускной способности ВЛ: анализ технических решений / С. В. Колосов, С. В. Рыжков:- М.: ЗАО НТЦ «Электросети».- 2011.– 36 с.
7. Журавлёв В., Средства диагностики и предотвращения снегоналипания и гололедообразования на воздушных линиях 6–150 кВ / Журавлёв В. // Новости Электротехники. – 2017. – 5. – С.2-10.
8. Костиков И.С. Современные провода для ВЛЭП – надёжность и экономия / И.С. Костиков:-М.: ООО «Нексанс Рус.». -2010.- 5 с.

References

1. Couneson P., Lamsoul J., Delplanque D., Capelle T., Havaux M., Guery D., Delree X.: Improve the performance of existing high-voltage power lines with fully closed and grounding wires. Report of CIGRE 22209; Paris, 1998.
2. Olivary D., Hauchart J.-L. - Investigation of the aerodynamic blowing of electric cables with weak surface roughness - Von Karman Institute for Fluid Dynamics - Waterloo, 72 B-1640 Rhode-Saint-Genese - Belgium Ref. EAR 8710 / DO-JLM / nt.
3. Gaudry M., Chore F., Hardy C., Ghannoum E. – Increasing the ampacity of overhead lines using homogeneous compact conductors. – CIGRE 1998 – 22-201.
4. Kulikov A.S. Aero-Z - high-tech wires for high-voltage power transmission lines//Third Russian with international participation scientific and practical conference "LINE 2008" (June 5-8, 2008)/Novosibirsk, 2008.– Page 97.
5. Department of Technical Development of JSC "MRSK Center." Review of new technologies in energy/Department of Technical Development of JSC "MRSK Center"//Review of new technologies in energy. -2008. - № 1.
6. Kolosov S. V. Increased capacity of VL: analysis of technical solutions/S. V. Kolosov, S. V. Ryzhkov: - M.: CJSC NTC "Electric Networks" - 2011.- 36 p.
7. Zhuravlev V., Means of Diagnostics and Prevention of Snow and Ice Formation on Air Lines 6-150 kV/Zhuravlev V.//News Electrical Engineering. - 2017. - 5. - C.2-10.
8. Kostikov I.S. Modern wires for VLEP - reliability and savings/I.S. Kostikov: -M.: LLC "Necsans Rus." -2010.- 5 p.

УДК.621.311

Применение биогазовых установок с коллекторным водонагревателем в Республике Крым

М.А. Старченко[1], И.А. Кочетов[2], Т.С. Старченко[3], В.В. Кувшинов[4], С.А. Абейдулин[5]

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [1] warrior2me@gmail.com, [2] kochetov.vano@mail.ru, [3] tausik.maxy@yandex.ru, [4] kuvshinov.vladimir@gmail.com, [5] abeidylin@mail.ru

Статья поступила 17.01.2020 г.; после доработки 21.01.2020 г.

Аннотация

В данной статье проанализирован биоэнергетический потенциал Республики Крым в области животноводства. Рассмотрена возможность и целесообразность применения биогазовых установок для тепло и электроснабжения населенных пунктов сельской местности. Предложен вариант применения биогазовой установки с коллекторным водонагревателем.

Ключевые слова: биоэнергетика, возобновляемая энергетика, Республика Крым, биогазовая установка, биоконверсия, коллекторный водонагреватель.

The use of biogas plants with a collector water heater in the Republic of Crimea

M.A. Starchenko[1], I.A. Kochetov[2], T.S. Starchenko[3], V.V. Kuvshinov[4], S.A. Abeydulin[5]

FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia. [1] warrior2me@gmail.com, [2] kochetov.vano@mail.ru, [3] tausik.maxy@yandex.ru, [4] kuvshinov.vladimir@gmail.com, [5] abeidylin@mail.ru

Received 17.01.2020 y.; received in final form 21.01.2020 y.

Abstract

This article analyzes the bioenergy potential of the Republic of Crimea in the field of animal husbandry. The possibility and feasibility of using biogas plants for heat and power supply of rural settlements are considered. An application of a biogas plant with a collector water heater is proposed.

Keywords: bioenergy, renewable energy, Republic of Crimea, biogas plant, bioconversion, collector water heater.

Введение

На сегодняшний день страны с развитой промышленностью производят основную часть электроэнергии централизованно, на тепловых, атомных и гидроэлектростанциях. Мощные электростанции благодаря «эффекту масштаба» имеют хорошие экономические показатели и передают электроэнергию на большие расстояния. Место строительства большинства из них обусловлено множеством экономических, экологических, географических и геологических факторов, а также требованиями безопасности и охраны окружающей среды [7, 8].

Однако, несмотря на «эффект масштаба», обуславливающего экономическое преимущество таких станций, существуют и негативные составляющие. Так, передача электроэнергии, даже на высоком напряжении, сопряжена с её потерями. Потери электроэнергии становятся еще

значительнее на следующих, более низких ступенях напряжения.

При передаче тепловой энергии ситуация еще сложнее: передавать ее на большие расстояния невозможно, так как это сопряжено с недопустимыми потерями даже при качественной изоляции теплотрасс.

Установка станций, снабжающих потребителя помимо электричества еще и теплом, характерна лишь для городов и не является экологичным решением.

Анализ проблемы и постановка задачи

В последние десятилетия наметилась тенденция на переход к распределенной генерации тепловой и электрической энергии с использованием возобновляемых источников энергии.

В частных домах, за городом и в сельской местности, применяются солнечные коллекторы и батареи, микро-ВЭУ, биоэнергетические установки.

Последние являются особенно актуальными для удаленных населенных пунктов в которых развито сельское хозяйство, поскольку основным источником таких установок являются отходы животноводства и сельского хозяйства. Республика Крым в этой связи является потенциально перспективным регионом для внедрения такого способа получения энергии [4, 5].

Цель данной статьи – проанализировать возможность и целесообразность применения биоэнергетических установок в Республике Крым для электро и теплоснабжения поселков.

Анализ биоэнергетического потенциала Крыма

Один из способов получения энергии из отходов – биоконверсия – состоит в управляемом анаэробном сбраживании отходов при участии бактерий; органические вещества разлагаются без доступа кислорода в среде с регулируемыми параметрами [1]. Анаэробное разложение биомассы является двухстадийным процессом.

Первая стадия – получение простых органических кислот из сложных органических веществ и высокомолекулярных соединений (жиров, углеводов, белковых веществ). В данной стадии участвуют так называемые кислотообразующие бактерии.

Вторая стадия – перевод простых кислот в метан и углекислоту. Здесь принимают участие метанобразующие бактерии. Полученная смесь газов – метана (~ 65 %) и углекислого газа (~ 30 %), а также водорода, кислорода, сульфида водорода, азота, оксида углерода (~ 5 %) – называется биогазом. Источником энергии при дальнейшем сжигании является метан (CH_4). Его количество регулируется путём изменения физических параметров процесса [1].

Температурный диапазон мезофильного сбраживания должен составлять от 30 до 45 °С, термофильного – от 45 до 60 °С. Данный процесс занимает от 10 до 20 суток. Из этого следует, что климатические условия Крыма, особенно в летний период, благоприятствуют процессу выработки биогаза [1].

Проанализируем сырьевой потенциал при выработке биогаза из отходов животноводства на примере крупного рогатого скота. Согласно управлению федеральной службы государственной статистики по р. Крым и г. Севастополю, поголовье крупного рогатого скота суммарно составляет 100,9 тыс. При этом большая часть приходится на муниципальные образования степной части полуострова (рис. 1), чем обусловлена эффективность применения биогазовых установок в данных районах [2].

Оценим сколько электрической и тепловой энергии потенциально возможно выработать в каждом из районов.

При содержании 10 тыс. голов крупного рогатого скота на одном откормочном пункте образуется около 260 тонн навоза в сутки. Это значит, что на одну голову приходится 0,026 тонн. Из одной тонны вырабатывается 60 $м^3$ биогаза, при сжигании 1 $м^3$ которого, вырабатывается электрической и тепловой энергии, соответственно, 2 $кВт \cdot ч$ и 12 тыс. кДж. Количество электроэнергии, вырабатываемое, например, в Красногвардейском районе составит:

$$6200 \cdot 0,026 \cdot 60 \cdot 2 = 19344 \quad кВт \cdot ч.$$

Аналогично рассчитываем для каждого района и сводим таблицу 1.

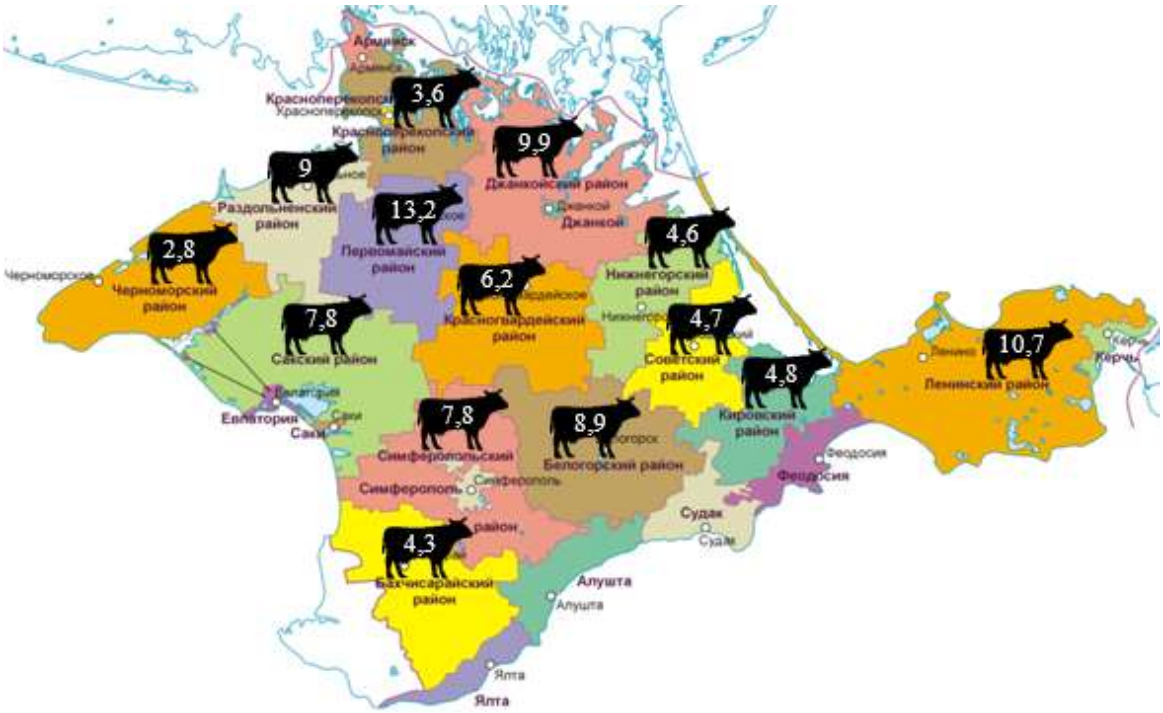


Рис. 1. Поголовье скота в р. Крым по муниципальным образованиям, тыс. голов.

Произведем сравнение на примере Раздольненского района.

Таблица 1. *Выработка энергии биогазом по районам*

Район	Поголовье, тыс. голов	Выработка	
		Электро-энергии, МВт · ч	Тепловой энергии, тыс. МДж
Первомайский	13,2	41,18	247,1
Ленинский	10,7	33,38	200,3
Джанкойский	9,9	30,89	185,33
Раздольненский	9	28,08	168,48
Белогорский	8,9	27,77	166,61
Сакский	7,8	24,34	146,02
Симферопольский	7,8	24,34	146,02
Красногвардейский	6,2	19,34	116,06
Кировский	4,8	14,98	89,86
Советский	4,7	14,66	87,98
Нижнегорский	4,6	14,35	86,11
Бахчисарайский	4,3	13,42	80,5
Красноперекопский	3,6	11,23	67,39
Черноморский	2,8	8,74	52,42
Суммарно	98,3	306,7	1840,18

Оценочное энергопотребление в зимний период физическими лицами в Раздольненском районе составляет 3000 МВт·ч за месяц.

В пересчете на 30 дней с использованием биогаза возможно выработать:

$$28,08 \cdot 30 = 842,4 \quad \text{МВт} \cdot \text{ч}.$$

Что составляет 28 % и можно считать значительным.

Данная оценка принята идеализированной. В действительности трудно реализовать переработку всех отходов по причине ограниченности объема емкости, их количества, а также неодновременности выработки (для получения биогаза требуется 10-20 суток). Тем не менее с учетом всех вышеуказанных факторов, реально добиться покрытия потребления на уроне 7-10 %, что является существенным.

Биогазовый агрегат анаэробной ферментации с солнечными водонагревательными системами

Предлагается использовать комбинированный биогазовый агрегат с применением коллектора. В нем используется подвод тепла и перемешивание. Рассмотрим принцип работы данной установки.

Подвод тепла происходит: перегретым паром при давлении 0,08-0,5 МПа, подающимся в сбраживаемую биомассу; используя горячую

воду, циркулирующую в змеевиках или же водяной рубашке; с помощью электронагревательных элементов в наружной поверхности реактора [3].

Перемешивание совершается за счет: механических мешалок различной формы или погружными насосами; при использовании гидравлических насадок за счёт энергии струи, перекачиваемой насосами сбраживаемой биомассы или рециркуляции; применяя избыточное давление биогаза, пропускаемого через барботёр или трубку, расположенную в нижней части реактора.

Предварительная подготовка органических отходов перед подачей их на анаэробное сбраживание происходит путем измельчения, нагрева биомассы до определенной температуры. С помощью содержания органического вещества можно определить стабилизацию исходной биомассы [4].

Применяется автоматическое управление и контроль следующих параметров процесса сбраживания за счет: температуры, pH среды. Контролируются уровни биомассы в реакторе, содержанию органического вещества в реакторе, давления газовой фазы, дозированной загрузки и выгрузки реактора, а также выход биогаза.

Аппарат включает в себя систему подогрева воды, состоящей из водонагревателя, питателя и расширителя, приёмной ёмкости для свежего навоза, реактора, нормализатора биогаза, газгольдера, циркуляционного насоса горячей воды (рис. 2).

Внутри реактора расположена циркуляционная труба, обогреваемая горячей водой. В циркуляционной трубе подключена мешалка.

Агрегат содержит систему регулирования и контроля, имеющий: газовый счётчик, терморегулятор, блок контроля перемешивания, уровнемеры, дифференциальные манометры.

В конструкцию биогазового аппарата для фермы крупного рогатого скота заложена технология трёхстадийного сбраживания навоза, полностью гарантирующая экологическую чистоту процесса, снижение времени обработки отходов до 3-х суток, выход биогаза до 500-600 м^3 (на 1 т навоза при влажности 10 %). Агрегат перерабатывает в сутки до 15-20 тонн навоза. Ежесуточно установка может производить биогаз для производства 3 тыс. кВт·ч электроэнергии [5].

Термохимическая газификация влечет за собой частичное окисление углеводородосодержащего сырья, например: биомасса, торф и уголь, для получения газообразного энергоносителя.

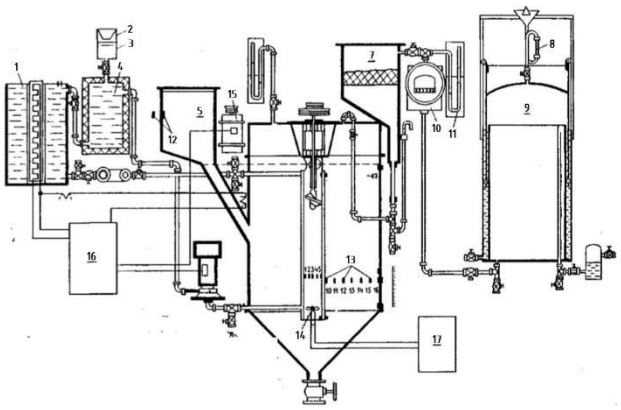


Рис. 2. Схема биоэнергетического агрегата: 1 - водонагреватель; 2,3 - питатель; 4 - компенсатор; 5 - приёмная ёмкость для свежего навоза; 6 - циркуляционный наос; 7 - нормализатор биогаза; 8 - гидравлический затвор; 9 - газгольдер; 10 - газовый счётчик; 11 - монометр; 12 - реактор; 13 - уровнемер; 14 - циркуляционная труба; 15 - привод пропеллерной мешалки; 16 - терморегулятор; 17 - блок контроля перемешивания.

Для непрерывного нагрева биомассы до заданной температуры сбраживания для нашей установки добавим солнечные водонагревательные системы (рис.3). Также излишки тепла могут быть использованы для отопления частных территорий.

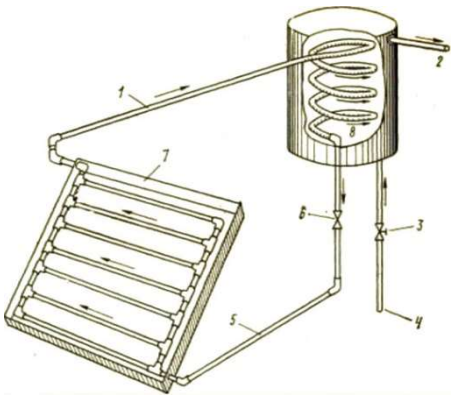


Рис. 3. Применение агрегата с теплообменником внутри бака:
1 - горячая вода; 2 - выпуск горячей воды; 3 - вентиль; 4 - подача холодной воды; 5 - холодная вода; 6 - обратный клапан; 7 - коллектор; 8 - теплообменник.

Агрегат включает в себя коллектор солнечной энергии, бак-аккумулятор горячей воды, подъемную и опускную трубы. В нижнюю часть бака-аккумулятора поступает холодная вода из водопровода, тем временем горячая вода

же к потребителям отводится из верхней части бака [6].

Главное условие эффективной работы данного агрегата – чтобы бак-аккумулятор располагался выше коллектора солнечной энергии. При таком расположении конструкции происходит циркуляция теплоносителей в термосифонном контуре, а также исключается обратная циркуляция ночью.

Для эффективного использования этой установки необходима улучшенная тепловая изоляция всех нагреваемых поверхностей: подъемной и опускной труб, бака-аккумулятора, патрубка для подвода горячей воды к водоразборным кранам.

Заключение

Проанализировав вышеизложенное, можно сделать следующие основные выводы:

- Применение биоэнергетических установок в Крыму является перспективным, поскольку на полуострове имеется множество животноводческих хозяйств, птицеферм, а треть населения проживает в сельской местности;
- Применение биоэнергетических установок является эффективным способом обеспечения локального электро и теплоснабжения в сельских районах;
- Также данная технология благоприятно влияет на экологию, поскольку отходы животноводства, особенно в крупных хозяйствах, производят загрязнение поверхностных и грунтовых вод. В случае же переработки отходов в биоэнергетических установках повышается эффективность их ликвидации;
- В результате анаэробного разложения отходов образуется азотосодежащий отстой. Большое содержание азота позволяет использовать отстой в качестве удобрения, не уступающего по качеству традиционным минеральным удобрениям;
- Биоэнергетика способствует развитию рынка энергетики в целом, что положительно сказывается на экономике региона.

Список литературы

1. Баранов Н.Н. Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии: учебное пособие для вузов / Н.Н. Баранов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 384 с.: ил.
2. Управление федеральной службы государственной статистики по р. Крым и г. Севастополю, «Поголовье скота и птицы в хозяйствах всех категорий по муниципальным образованиям на 1 января 2019 года».
3. Кувшинов В.В., Морозова Н.В., Софийский И.Ю. Энергетические установки на основе возобновляемых источников энергии. Учебное пособие. Методические рекомендации. - М.: Спутник+, 2018. - 236 с.
4. Кувшинов В.В. Биогазовые технологии в сельском хозяйстве. Проблемы и перспективы развития в Республике Крым / В.В. Кувшинов, И.Г. Жиганов, В.В. Смирнов, А.А. Важенин, Э.Л. Хайбулаев // 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. - Севастополь, 2018. - С. 637-642.
5. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме Республики Крым и г. Севастополя / В.В. Гурьев, Е.Г. Какушина, Б.А. Якимович, В.В. Кувшинов // Энергетические установки и технологии. - 2019. - Т. 5. - № 2. - С. 90-93.
6. Жиганов И.Г. Комбинированная солнечно-биоэнергетическая установка для сельского хозяйства Республики Крым / И.Г. Жиганов, В.В. Кувшинов, А.А. Ненько, Д.С. Здарьев // Энергетические установки и технологии. - 2019. - Т. 5. - № 2. - С. 94-98.
7. Распределенная энергетика [Электронный ресурс]: Википедия. Свободная энциклопедия. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Распределенная_энергетика (дата обращения: 27.02.2020).
8. Руди Д.Ю. Распределённая энергетика / Руди Д.Ю. // Сборник научных статей 4-й Международной научной конференции Поколение будущего: взгляд молодых ученых – 2015. – в 4 т.

References

1. Baranov N.N. Non-traditional sources and methods of energy conversion: a textbook for universities / N.N. Rams. - M.: Publishing House MPEI, 2012 .- 384 p.: Ill.
2. Office of the Federal State Statistics Service for r. Crimea and the city of Sevastopol, “Livestock and poultry on farms of all categories by municipalities as of January 1, 2019”.
3. Kuvshinov V.V., Morozova N.V., Sofiysky I.Yu. Power plants based on renewable energy sources. Tutorial. Guidelines. - M .: Sputnik +, 2018 . - 236 p.
4. Kuvshinov V.V. Biogas technologies in agriculture. Problems and development prospects in the Republic of Crimea / V.V. Kuvshinov, I.G. Zhiganov, V.V. Smirnov, A.A. Vazhenin, E.L. Khaibulaev // Ecological, industrial and energy security - 2018: a col-

lection of articles on the materials of the international scientific and practical conference / Ed. L.I. Lukina, N.A. Bezhin, N.V. Lyamina. - Sevastopol, 2018 .- p. 637- 642.
5. Guryev V.V. Development of renewable sources of electricity in the power system of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol / V.V. Guryev, E.G. Kaku-shina, B.A. Yakimovich, V.V. Kuvshinov // Power plants and technologies. - 2019.- T. 5. - No. 2. - p. 90-93.
6. Zhiganov I.G. Combined solar-bio-energy installation for agriculture of the Republic of Crimea / I.G. Zhiganov, V.V. Kuvshinov, A.A. Nenko, D.S. Zdaryev // Power plants and technologies. - 2019.- T. 5. - No. 2. - p. 94-98.
7. Distributed Energy [Electronic resource]: Wikipedia. Free encyclopedia. - Access mode: https://ru.wikipedia.org/wiki/Distributed_energy (accessed: 02.27.2020).
8. Rudy D.Yu. Distributed energy / Ru-di D.Yu. // Collection of scientific articles of the 4th International Scientific Conference Generation of the Future: A View of Young Scientists - 2015. - in 4 v.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ АТОМНЫХ СТАНЦИЙ

УДК 51-72:532.573.8

Математические методы исследования скорости испарения жидкости

О.В.Матузаева, С.А.Чернявская, Л.В.Третьякова, А.Г. Рипп, С.В. Гайдук
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия., e-mail: olga·matuzaeva@mail.ru, svalch74@mail.ru, Li-li71@yandex.ru, SVGaidyk@sevsu.ru, ripp1946@mail.ru

Статья поступила 14.02.2020 г.; после доработки 18.02.2020 г.

Аннотация

В работе рассмотрено описание методов и факторов, влияющих на скорость испарения жидкости. Исследование зависимости скорости испарения воды в капилляре от длины свободной части капилляра. Приводится решение уравнения характеризующего процесс диффузии. Показано, что скорость испарения и зависит от длины свободной части трубки ℓ, и что зависимость и(ℓ) – обратно пропорциональная.

*Ключевые слова:*испарение, диффузия, градиент плотности, ряд Фурье, дифференциальные уравнения в часныхпроизводных, граничные условия.

Mathematical methods for studying the rate of liquid evaporation

O. V. Matuzaeva, S. A. Chernyavskaya, L. V. Tretyakova, A. G. RIPP, S. V. Gaiduk[2]
Sevastopol state University, Sevastopol, 299053, Russia, e-mail: olga.matuzaeva@mail.ru, svalch74@mail.ru, Li-li71@yandex.ru, ripp1946@mail.ru

Received 14.02.2020 y.; received in final form 18.02.2020 y.

Abstract

This paper describes methods and factors that affect the rate of liquid evaporation. Investigation of the dependence of the evaporation rate of water in the capillary on the length of the free part of the capillary. The solution of the equation characterizing the diffusion process is given. It is shown that the evaporation rate u de pends on the length of the free part of the tube ℓ. And that the dependence u (ℓ) is inversely proportional.

Keywords: evaporation, diffusion, density gradient, Fourier series, differential equations in linear derivatives, boundary conditions.

Введение

Испарение – это процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное. Причиной испарения является хаотическое движение молекул жидкости. Несмотря на то, что между молекулами в жидкости действуют силы притяжения, которые не дают им разлететься в разные стороны, некоторые, наиболее быстрые молекулы, находящиеся вблизи границы между жидкостью и газом (например, воздухом), могут преодолеть притяжение и вылететь из жидкости. Вылетевшие молекулы, оказавшись в газообразной среде и диффундируя в ней, становятся частью этой среды, так что представляют собой уже не жидкость, а газ.

Одновременно с испарением всегда идёт и обратный процесс перехода вещества из газообразного состояния в жидкое. Он называется *конденсацией* и тоже вызывается хаотическим движением молекул – тех, которые находятся в газо-

образной среде. Некоторые молекулы пара, оказавшиеся вблизи поверхности жидкости, влетают в жидкость, после чего сами уже становятся частью жидкости.

Испарение и конденсация – два конкурирующих процесса. Если испарение преобладает над конденсацией, то количество жидкости с течением времени уменьшается, а количество пара увеличивается. Если преобладает конденсация, то наоборот – количество пара уменьшается, а количество жидкости растёт. В том случае, когда жидкость налита в закрытый сосуд, между испарением и конденсацией может возникнуть *динамическое равновесие*, при котором скорость испарения равна скорости конденсации, так что количество жидкости и количество пара с течением времени не изменяются. В этом случае говорят, что *пар находится в равновесии со своей жидкостью*. Причина динамического равновесия состоит в следующем. Как только жидкость налита в сосуд, который закрыт, начинается испарение. Конденсации пока нет, так как ещё практически нет пара – для его появления некоторое время должен протекать процесс испарения. Так как молекулы, покидающие жидкость, не могут покинуть сосуд (он закрыт), то количество молекул в паре над жидкостью с течением времени увеличивается, а из-за этого увеличивается и среднее количество молекул пара, которые в каждую секунду случайно влетают в жидкость, то есть нарастает скорость конденсации. Если жидкости в сосуде достаточно много, то и пара над ней может появиться столько, что скорость его конденсации вырастет до скорости испарения. В этот момент и возникает динамическое равновесие: сколько молекул в среднем вылетает из жидкости в пар, столько же в среднем и возвращается назад.

Интересно, что наблюдателю, который не видит молекул, момент наступления динамического равновесия представляется моментом окончания испарения – количество жидкости больше не уменьшается. Это означает, что скорость испарения жидкости можно понимать двумя разными способами:

- *микроскопическая* скорость испарения – это среднее значение суммарной массы молекул, вылетающих из жидкости в единицу времени,
- *макроскопическая* скорость испарения – это среднее значение разницы между суммарной массой вылетающих молекул и суммарной массой молекул, влетающих в жидкость из пара.

Микроскопическая скорость испарения может обратиться в нуль, только если вся жидкость испарилась. Макроскопическая скорость испарения обращается в нуль в момент достижения равновесия между жидкостью и паром.

Пар, находящийся в равновесии со своей жидкостью, называется *насыщенным паром.* Главной его количественной характеристикой является *парциальное давление,* которое зависит от свойств жидкости и от температуры системы. С ростом температуры давление насыщенного пара тоже растёт. Это объясняется тем, что с ростом температуры увеличивается средняя скорость движения молекул – как в жидкости, так и в паре. В результате происходит следующее.

- Во-первых, в жидкости нарастает среднее количество быстрых молекул – тех, которые могут преодолеть притяжения, действующие между молекулами в жидкости, и вылететь в пар. Поэтому нарастает скорость испарения, и равновесие между жидкостью и паром устанавливается при большем количестве молекул в паре, а чем больше в паре молекул, тем большее давление они создают.
- Во-вторых, чем больше средняя скорость молекул газа (пара), тем больше средняя сила, с которой каждая молекула ударяет по предметам, находящимся в контакте с газом, и тем больше давление газа.

Есть несколько формул, определяющих зависимость давления насыщенного пара от температуры. Те, которые попроще, являются приближёнными, а те, которые поточнее, сложны для расчётов. Поэтому на практике для определения давления насыщенного пара обычно пользуются не теоретическими формулами, а справочными таблицами, где для различных жидкостей приведены достаточно точные результаты *измерений*.

Постановка задачи

Итак, если сосуд с жидкостью закрыт и жидкости в сосуде достаточно много, то устанавливается равновесие и количество жидкости в сосуде не изменяется. Если же сосуд открыт, то есть, соединён с атмосферой, то молекулы, вылетающие из жидкости, рассеиваются в атмосфере, перемешиваясь с ней. Это рассеяние называется *диффузией*.

Диффузия – это процесс *выравнивания* в пространстве плотности вещества и концентрации его молекул. Диффузию обычно делят на два типа: *самодиффузию* и *взаимодиффузию*.

Если вещество состоит из одинаковых молекул, то есть оно является химически чистым, но

по какой-то причине вещество неравномерно распределено в той области пространства, которую оно занимает, то плотность этого вещества в разных точках пространства разная и возникает процесс выравнивания плотности, который называют *самодиффузией*.

Другая ситуация, когда молекулы вещества – это смесь молекул нескольких сортов. В этом случае говорят, что вещество состоит из нескольких *компонентов*, и если хотя бы один из компонентов распределён в пространстве неравномерно, то возникает процесс выравнивание плотности этого компонента.

В результате молекулы данного компонента диффундируют, то есть распространяются из области с повышенной плотностью в области с пониженной плотностью. Одновременно молекулы других компонентов занимают места, которые освобождают молекулы первого компонента, то есть тоже диффундируют. Таким образом, в диффузии участвуют все компоненты – это и называют *взаимодиффузией*.

Рассмотрим, как количественно описывается диффузия. В равновесной системе скорость отдельной молекулы – это случайный вектор $\boldsymbol{v}$, среднее значение которого равно нулю: $\langle \boldsymbol{v} \rangle = 0$. Если в системе протекает диффузия, то система стремится к равновесию, но ещё не равновесна. Поэтому $\langle \boldsymbol{v} \rangle \neq 0$. Отличный от нуля вектор $\langle \boldsymbol{v} \rangle$называется *скоростью дрейфа*.

Естественно, что эта скорость вызвана процессом диффузии и направлена в сторону наиболее быстрого убывания плотности вещества. Дрейфующие (диффундирующие) молекулы переносят с собой массу. Масса вещества, проходящая в единицу времени через произвольную поверхность A, называется *потоком массы* Φ_m.

Если поверхность A – это маленькая площадка, расположенная перпендикулярно скорости дрейфа и имеющая площадь ΔS, то поток через неё $\Delta\Phi_m$ пропорционален ΔS:

$$\Delta\Phi_m = j_m \Delta S \qquad (1)$$

Величина j_m называется *плотностью потока массы*. В отличие от Φ_m, величина j_m считается *вектором*, направление этого вектора совпадает с направлением скорости дрейфа.

Вектор плотности потока массы $\mathbf{j}_m$ является наиболее подробной физической величиной, описывающей диффузию, так как эта величина является *локальной*, то есть характеризует диффузию *в каждой точке* пространства.

Немецкий физиолог А. Фик в 1885 году сформулировал закон, утверждающий, что плотность потока массы в процессе диффузии пропорциональна градиенту плотности вещества:

$$j_m = -D\frac{d\rho}{dx} \qquad (2)$$

В этой формуле ρ – плотность вещества в данной точке, ось OX направлена так же, как скорость дрейфа, производная $\frac{d\rho}{dx}$ называется *градиентом плотности*, коэффициент пропорциональности между j_m и $\frac{d\rho}{dx}$, обозначенный в формуле (2) буквой D, называется *коэффициентом диффузии*. Знак минус в формуле поставлен потому, что в направлении оси OX (то есть в направлении скорости дрейфа) плотность вещества убывает, так что производная $\frac{d\rho}{dx}$ отрицательна.

Рассмотрим вертикально расположенную трубку цилиндрической формы, запаянную снизу, но открытую сверху. Примем ось цилиндра за ось OX – см рисунок 1.1.

Пусть в трубке налита вода, объем которой равен половине объема цилиндра. Вследствие испарения воды и диффузии водяного пара в атмосферу уровень воды в трубке постепенно понижается до тех пор, пока вся вода не испарится. Выясним, с какой скоростью испаряется вода.

Количественной характеристикой макроскопической скорости испарения может служить *быстрота уменьшения высоты столба воды* в трубке. Обозначим эту высоту буквой h. Тогда макроскопическая скорость испарения u равна

$$u = -\frac{dh}{dt} \qquad (3)$$

Знак минус здесь поставлен потому, что высота уровня воды с течением времени уменьшается, так что производная $\frac{dh}{dt}$ отрицательна. В дальнейшем для краткости будем опускать термин «макроскопическая».

Скорость испарения u влияет на плотность потока массы вблизи границы между жидкостью и паром. Рассмотрим сечение трубки A_1, которое в некоторый момент времени t проходит по границе между жидкостью и паром. Часть трубки сверху от сечения A_1 будем называть *свободной частью*. Пусть координата сечения A_1 равна x_1, а площадь – S. Обозначим dm_1 массу пара, прошедшего через сечение A_1 за малое время dt. Эта масса равна массе жидкости, испарившейся за малое время dt. Так как за время dt уровень воды

понижается на $|dh| = udt$, то объём испарившейся воды равен $dV = S|dh| = Sudt$. Тогда

$$dm_1 = \rho_B Sudt, \tag{4}$$

где $\rho_в$ – плотность воды. Отсюда следует, что поток массы пара через сечение A_1 равен

$$\Phi_m(x_1) = \frac{dm_1}{dt} = \rho_B Su, \tag{5}$$

а плотность потока массы равна

$$j_m(x_1) = \frac{d\Phi_m(x_1)}{dt} = \rho_B u \tag{6}$$

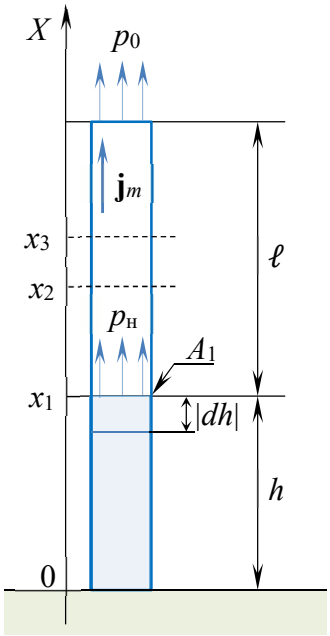


Рис. 1.1. Испарение жидкости и диффузия пара.

Итак, скорость испарения можно узнать, если известна плотность потока массы вблизи границы между жидкостью и паром.

При отсутствии конвекции коэффициент молекулярной диффузии получается путем сравнения результата с решением основного дифференциального уравнения диффузии:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D\frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \tag{8}$$

Заменим в уравнении (9) величину p новой переменной P, так чтобы с увеличением t от нуля до бесконечности она изменялась бы от1 до 0.

Обозначим через p0 начальное парциальное давление. Так как объем воды равен половине объема цилиндра, то p изменяется от p0 до 0,5p0.

Тогда P определится равенством:

$$P = 2\left(\frac{\rho}{p_0} - \frac{1}{2}\right) \tag{9}$$

Подставим (10) в (9):

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \tag{10}$$

Решим уравнение (11) с краевыми условиями

$$P = 1 \text{ при } t = 0 \tag{11}$$

$$P = 0 \text{ при } t = \infty \tag{12}$$

$$P = 0 \text{ при } x = 0 \tag{13}$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0 \text{ при } x = l \tag{14}$$

Последнее условие вытекает из того, что в конце цилиндра диффузия не происходит.

Положим, что P представляет собой произведение двух функций

$$P = \varphi(x)\cdot\psi(t) \tag{15}$$

Подставим (16) в (11)

$$\varphi\frac{\partial \psi}{\partial t} = D\psi\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \tag{16}$$

или

$$\frac{1}{D\psi}\cdot\frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{1}{\varphi}\cdot\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \tag{17}$$

Так как $\psi(t)$ – функция зависит от t, то левая часть (17) не зависит от x. Следовательно, если x пробегает всё свое множество значений, то левая часть последнего равенства остается не изменой. Аналогично, при изменении t ($\varphi(x)$ не зависит от t), правая часть (17) остается постоянной. Введем постоянную $-k^2$, которой равны обе части рассматриваемого равенства. То есть

$$\frac{1}{D\psi}\cdot\frac{\partial \psi}{\partial t} = -k^2 \tag{18}$$

$$\frac{1}{\varphi}\cdot\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = -k^2$$

(18) – обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка его решение имеет вид: $\frac{d\psi}{\psi} = -k^2 Ddt \Rightarrow \ln\psi = -C_1 k^2 D\cdot t$ или

$$\psi = C_1\cdot e^{-k^2 Dt} \tag{19}$$

(19) – линейное однородное дифференциальное уравнение второго порядка. Перепишем

его в виде:

$\varphi'' + k^2\varphi = 0 \Rightarrow \lambda^2 + k^2 = 0 \Rightarrow \lambda = \pm ki$. Окончательно, решение будет иметь вид:

$$\varphi = C_2 \cos kx + C_3 \sin kx \qquad (21)$$

Искомая функция *P* определяется как произведение (20) и (21):

$$P = \psi\varphi = C_1 \cdot e^{-k^2 Dt} \cdot \left(C_2 \cos kx + C_3 \sin kx\right) \qquad (22)$$

Условию (12) эта функция удовлетворяет при любых значений постоянных C_1, C_2, C_3. Условию (14) функция будет удовлетворять при $C_2 = 0$. Из (14) следует, что

$$\frac{\partial P}{\partial x} = C_1 \cdot C_3 \cdot e^{-k^2 Dt} \cdot \left(\sin kx\right)'_x = C_1 \cdot C_3 \cdot e^{-k^2 Dt} \cdot k \cos kx = 0$$

при $x = l$, то есть

$$\cos kl = 0;$$

$$kl = \frac{\pi}{2} + \pi n \Rightarrow k = \frac{(2n-1)\pi}{2l}, \quad n \in \square \cdot$$

Таким образом, (21) примет вид:

$$P = C_4 \cdot e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 Dt}{4l^2}} \cdot \sin\frac{(2n-1)\pi x}{2l}, \qquad (22)$$

где $C_4 = C_1 \cdot C_3$.

Подчиним решение (22) условию (11). Придавая *n* различные целые значения, то получим множество решений, сумма которых так же будет являться решением (22). Следовательно, решение уравнения (16) запишем в виде:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 Dt}{4l^2}} \cdot \sin\frac{(2n-1)\pi x}{2l}, \qquad (23)$$

или

$$P = A_1 e^{-\frac{\pi^2 Dt}{4l^2}} \cdot \sin\frac{\pi x}{2l} + A_2 e^{-\frac{4\pi^2 Dt}{4l^2}} \cdot \sin\frac{2\pi x}{2l} + A_3 e^{-\frac{9\pi^2 Dt}{4l^2}} \cdot \sin\frac{3\pi x}{2l} + \ldots \qquad (24)$$

Подберем постоянные $A_1, A_2, A_3, \ldots$ так, чтобы выполнялось условие (1.12), т.е.:

$$1 = A_1 \sin\frac{\pi x}{2l} + A_2 \sin\frac{2\pi x}{2l} + A_3 \sin\frac{3\pi x}{2l} + \ldots \qquad (25)$$

Разложение единицы в ряд Фурье по синусам в интервале $(0; 2l)$ имеет вид:

$$1 = \frac{4}{\pi}\left(\sin\frac{\pi x}{2l} + \frac{1}{3}\sin\frac{3\pi x}{2l} + \frac{1}{5}\sin\frac{5\pi x}{2l} + \ldots\right) \qquad (26)$$

Сравнивая ряды (25) и (26) получим, что при нечетных значениях n $A_n = \frac{4}{\pi n}$. Следовательно, $A_n = \frac{4}{\pi(2n-1)}$. После подстановки в (24) имеем:

$$P = \frac{4}{\pi}\left(e^{-\frac{\pi^2 Dt}{4l^2}} \cdot \sin\frac{\pi x}{2l} + \frac{1}{3}e^{-\frac{9\pi^2 Dt}{4l^2}} \cdot \sin\frac{3\pi x}{2l} + \frac{1}{5}e^{-\frac{25\pi^2 Dt}{4l^2}} \cdot \sin\frac{5\pi x}{2l} + \ldots\right) \qquad (27)$$

И равенства (9) получаем, что

$$\rho = \frac{1}{2}\rho_0 + \frac{1}{2}\rho_0 P \cdot$$

Отсюда масса потока $\rho = \frac{1}{2}\rho_0 + \frac{1}{2}\rho_0 P \cdot$

$$m = \int_0^l \rho dx = \int_0^l \left(\frac{1}{2}\rho_0 + \frac{1}{2}\rho_0 P\right) dx \cdot$$

$$m = \frac{1}{2}\rho_0 l + \frac{1}{2}\rho_0 \frac{4}{\pi^2}\left(e^{-\frac{\pi^2 Dt}{4l^2}} + \frac{1}{9}e^{-\frac{9\pi^2 Dt}{4l^2}} + \frac{1}{25}e^{-\frac{25\pi^2 Dt}{4l^2}} + \ldots\right) \cdot$$

Ряд в правой части быстро сходится и поэтому в скобках оставим первое слагаемое, а остальными можно пренебречь, при приближенном вычислении.

$$m = \frac{1}{2}\rho_0\left(l + \frac{4}{\pi^2}e^{-\frac{\pi^2 Dt}{4l^2}}\right) \qquad (28)$$

Тогда при неограниченном увеличении времени $t \to \infty$ масса стремится к постоянной величине пропорциональной длине

$$m \to \frac{1}{2}\rho_0\left(l + \frac{4}{\pi^2}\right) \qquad (29)$$

Таким образом, скорость испарения *u* зависит от длины свободной части трубки ℓ. Из формулы (29) следует, что зависимость $u(\ell)$ – обратно пропорциональная.

Список литературы

1. Тихонов А.Н. Уравнения математической физики / Л Тихонов А.Н., Самарский А.А. – 3-е изд., испр. М.: Наука, 1966.
2. Смирнов М.М. Дифференциальные уравнения в

частных производных второго порядка / Смирнов М.М. - М.: Наука, 1964.
3. Гельперин Н.И. Основные процессы и ап-параты химической технологии. М.:Химия, 1981, 812 с.
4. КутателадзеС.С. Основытеориитепло-обмена. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.

References

1. Tikhonov A. N. mathematical Equations physics / L Tikhonov A. N., Samarsky, A. – 3rd ed., ISPR. Moscow: Nauka, 1966.
2. Smirnov M. M. partial Differential equations research Institute in partial derivatives of the second order /
3. Smirnov M. M.-M.: Nauka, 1964. 3.Gelperin N. I. Basic processes and AP apparatus of chemical technology. M.: Chemistry, 1981, 812 p.
4. Kutateladze S. S. fundamentals of the theory of TEP-loopexchange. Mos- cow: Atomizdat, 1979. 416 PP.

УДК 574

Применение метода абсорбции для очистки газовоздушных выбросов

С.Т. Мирошниченко, В.А. Пухлий, Р.А. Ильчевский, В.А. Марунич, В.О. Пантель
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»,
ул.Университетская, 33 г.Севастополь, 99053, Россия
e-mail: pu1611@rambler.ru

Статья поступила 29.01.2020 г; после доработки 31.01.2020 г.

Аннотация

В химической промышленности абсорбция относится к наиболее распространенным методам очистки газов. В основе метода абсорбции лежит массообмен, т.е. переход вещества из газообразной в жидкую фазу через поверхность раздела обеих фаз. Рассматриваются свойства различных абсорбентов, в том числе воды. Анализируются различные типы абсорберов. В качестве примеров рассматриваются установки с инерционно-турбулентной подвижной насадкой (ИТПН), а также установка для поглощения хлора.

Ключевые слова: метод абсорбции, свойства воды, виды абсорбентов, типы насадок, абсорберы

Application of the absorption method for the purification of gas emissions

S.T. Miroshnichenko, V.A. Pukhliy, R.A. Ilchevsky, V.A. Marunich, V.O. Pantel
Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University",
Universitetskaya St., 33 Sevastopol, 99053, Russia
e-mail: pu1611@rambler.ru

Received 29.01.2020 y.; received in final form 31.01.2020 y.

Abstracrt

In the chemical industry, absorption is one of the most common methods for cleaning gases. The absorption method is based on mass transfer, i.e. the transition of a substance from a gaseous to a liquid phase through the interface of both phases. The properties of various absorbents, including water, are considered. Various types of absorbers are analyzed. As examples, we consider installations with an inertial-turbulent movable nozzle (ITPN), as well as a plant for the absorption of chlorine.

Keywords: absorption method, water properties, types of absorbents, types of nozzles, absorbers.

Введение

Абсорбция является одним из наиболее важных методов очистки газов и применяется во многих процессах. В основе метода абсорбции лежит массообмен, т.е. переход вещества из газообразной в жидкую фазу через поверхность раздела обеих фаз. Абсорбированное вещество физически растворяется в жидкости или вступает с ней в химическую реакцию.

Десорбция (или отпарка) представляет собой обратный процесс выделения поглощенного вещества из жидкой фазы.

В химической промышленности абсорбция относится к наиболее распространенным методам очистки газов. На практике абсорбции подвергаются чаще всего не отдельные газы, а газовые смеси, компоненты которых (один или несколько) могут поглощаться абсорбентом в заметных количествах. При этом происходит либо процесс физической абсорбции, либо абсорбент

вступает в химическое взаимодействие с абсорбируемым компонентом (хемосорбция).

Абсорбция как метод очистки газов характеризуется образованием значительных объемов жидких отходов (шламов), которые, как правило, подлежат дальнейшей переработке (регенерации), связанной с десорбцией. Кроме того, при использовании жидких поглотителей температура газов чаще всего понижается до температуры абсорбентов.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение проблемы очистки газовоздушных выбросов на основе метода абсорбции.

С этой целью необходимо провести анализ применяемых методов абсорбции, видов абсорбентов и установок, используемых для процессов абсорбции.

Свойство воды как абсорбента

В технике часто в качестве абсорбентов используют воду, ее растворы, а также малолетучие органические растворители. Рассмотрим некоторые свойства воды [1, 2]. Основная масса воды состоит из 2-х атомов протия ^{1}H и одного атома кислорода ^{16}O и описывается химической формулой H_2O. В природе водород кроме протия ^{1}H имеет еще два изотопа: дейтерий ^{2}H и тритий ^{3}H. Известны еще более тяжелые изотопы водорода, полученные искусственным путем: ^{4}H и ^{5}H. Что касается кислорода, то в природе известно 8 изотопов кислорода: ^{13}O, ^{14}O, ^{15}O, ^{16}O, ^{17}O, ^{18}O, ^{19}O, ^{20}O, а также один сверхтяжелый изотоп ^{24}O [2, 4]. Эти изотопы в различных сочетаниях входят в состав молекул воды. Известно 135 модификаций самой молекулы воды, при этом только 9 изотопов являются достаточно устойчивыми.

Расстояние между ядрами атомов водорода и кислорода в молекуле воды равно 0,09584 нм, а угол между направлениями связей составляет $\alpha = 104^{o}27'$. Расстояние между ядрами атомов водорода в молекуле воды равняется 0,1515 нм. На внешней электронной оболочке атома кислорода находятся 6 электронов, при этом два неспаренных электрона принимают участие в образовании ковалентной связи с атомами водорода. Остальные четыре электрона образуют собой две электронные пары, создавая относительно большую электронную плотность в противоположной части молекулы, что приводит к образованию двух полюсов

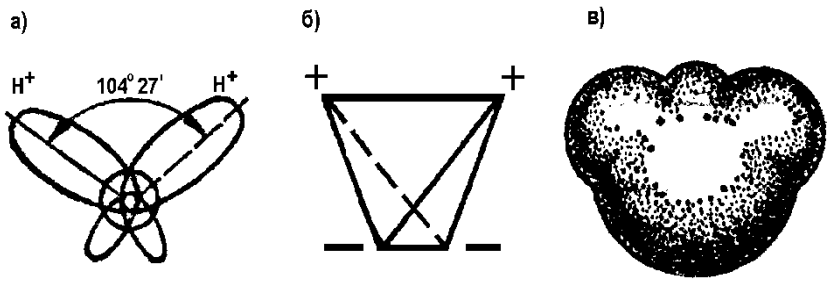


Рис.1. Схема строения молекулы воды: а) угол между связями О – Н; б) расположение полюсов заряда; в) структура электронного облака молекулы.

отрицательных зарядов. Ввиду этого молекула воды имеет четыре полюса зарядов, расположенных в вершинах несколько деформированного тетраэдра.

На рис.1 показана схема строения молекулы воды [3]. Как следует из рис.1 ядра водорода (протоны) почти полностью погружены в электронное облако кислорода.

В центре молекулы воды находится ядро кислорода. Расстояние между ядром кислорода и протоном у льда равняется 0,099 нм, у водяного пара – 0,0958 нм, а радиус молекулы воды равен 0,138 нм. Вследствие несимметрии распределения электрических зарядов молекула воды обладает ярко выра-женными полярными свойствами. Полярными, а также высокими донорно-акцепторными свойствами объясняется способность молекулы воды растворять многие вещества.

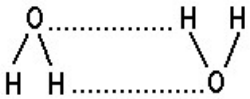
Молекулярной массе водяного пара соответствует химическая
формула H_2O.

В жидкой фазе вода наряду с простыми молекулами содержит и более сложные образования, которые соответствуют общей формуле

$(H_2O)_x$. Такие молекулярные комплексы постоянно возникают и распадаются в соответствии с реакциями:

$$xH_2O \leftrightarrow (H_2O)_x. \quad (1)$$

Молекула воды характеризуется образованием водородных связей, что основывается на взаимодействии атома водорода с сильно электроотрицательным элементом (например, с кислородом другой молекулы воды). Эта особенность водородного атома связана с тем, что отдавая единственный электрон на образование ковалентной связи с кислородом, сам атом остается в виде ядра очень малого размера, почти лишенного электронной оболочки. Ввиду этого водородный атом, притягивается электронной оболочкой кислорода другой молекулы воды и вступает с нею во взаимодействие, при этом наибольшая устойчивость характерная для удвоенных молекул воды $(H_2O)_2$, возникновение которых связано с образованием двух водородных связей, что можно представить следующей схемой:



(2)

где пунктиром обозначена водородная связь.

В соответствии с методом молекулярных орбиталей водородная связь образуется за счет дисперсных сил, ковалентной связи и электростатического взаимодействия.

Среди изотопных атомов Н и О особенно существенную роль в водной среде играет дейтерий. Причина различия между протием (^1H) и дейтерием (^2H) обусловлена тем обстоятельством, что протон совместно с нейтроном дейтерия характеризуется дополнительной силой, которая удерживает электрон, находящийся дальше от ядра по сравнению с электроном протия. В результате этого свободный атом дейтерия больше атома протия, что обуславливает их физико-химическую характеристику. В процессе смешивания тяжелой воды D_2O и легкой воды H_2O имеет место изотопный обмен по следующей реакции:

$$H_2O + D_2O \rightleftharpoons 2HDO. \quad (3)$$

Считается, что весь дейтерий в обыкновенной воде существует в форме HDO и концентрация его в воде одинакового порядка с микроэлементами. При любой обменной реакции количество дейтерия в химических веществах изменяется, что в свою очередь сказывается на свойствах получаемых веществ.

Молекула воды характеризуется особыми свойствами, которые обусловлены электрической асимметричностью и изотропностью ее строения. Свойство асимметричности распределения электрических зарядов в молекуле воды связано со стремлением зарядов нейтрализовать электрические поля. В результате возникают водородные связи, которые способствуют ассоциации каждой молекулы воды с 4-мя другими молекулами. Однако образующиеся водородные связи не могут разорвать и перестроить по-новому молекулу воды, поскольку в несколько раз слабее ковалентных связей, объединяющих О и Н в воде, ввиду чего создается особая динамичность молекулы воды. В жидком состоянии при обычных тепловых движениях молекул воды водородные связи легко могут быть разрушены с образованием новых. Налицо взаимодействие между силами теплового движения молекул и электрическими силами, которое в свою очередь связано с образованием ассоциатов молекул воды, что в значительной мере способствует растворению в ней многих веществ. Вследствие макромолекулярной структуры воды с большим количеством полостей жесткость воды увеличивается путем заполнения полостей при переходе из твердой в жидкую фазу или при процессах растворения некоторых веществ. В результате наблюдается аномальное изменение объема воды от температуры. Важным обстоятельством для жизни является тот факт, что вода при температуре Т = 3,98ºС имеет максимальную плотность, вследствие чего даже в большие морозы не происходит сплошное промерзание водоемов.

Вода химически не изменяется под действием большинства соединений, которые она растворяет, поскольку является инертным растворителем. Это свойство воды обеспечивает ее многие особенности, прежде всего полноценное питание живых существ и возможность многократного использования в природе и технологических циклах.

Физико-химические свойства воды изменяются с изменением изотопного состава воды [4, 2]. Вода с наименьшим количеством изотопных атомов является наиболее легкой и в природе находится в виде дождевой, талой, снеговой, а также получается, как отходы в процессе получения тяжелой воды. Легкая вода оказывает положительное воздействие на многие химические и биохимические процессы, в том числе и на процессы протекающие в живом организме. Часто

она называется «живой водой».

Вода, отвечающая химическим формулам $D_2{}^{16}O$, $D_2{}^{17}O$, $D_2{}^{18}O$ называется тяжелой водой. Тяжелая вода в количествах, имеющихся в природных источниках является инертной.

В значительных концентрациях тяжелая вода смертельна для всего живого. Часто она называется «мертвой водой». Тяжелая вода находит применение в промышленности. Производство D_2O основано на электролитическом разложении воды. Тяжелая вода применяется как замедлитель быстрых нейтронов при расщеплении урана в ядерных реакторах, а также как источник ядерного горючего. Так 1 г D_2O дает тепла в 10 млн. раз больше, чем сгорание 1 г угля.

Вода, содержащая тритий (^3H) и отвечающая химической формуле T_2O называется сверхтяжелой водой. Сверхтяжелая вода поступает на землю с осадками. Получается она также искусственно на основе ядерных реакций. Сверхтяжелая вода используется при термоядерных реакциях, в химических и биологических исследованиях в качестве меченой.

Основными преимуществами воды как абсорбента для удаления примесей газа является повсеместная доступность и дешевизна. Уже этих причин достаточно для детального изучения возможностей использования воды с целью извлечения из газа примесей, сравнительно хорошо растворимых в воде.

Применение воды особенно целесообразно для очистки больших объемов отходящих газов низкого давления в целях борьбы с загрязнением атмосферы, поскольку на таких установках трудно избежать потерь растворителя.

Обычно органические растворители имеют достаточно высокое давление паров, что вызывает значительные потери их вследствие испарения. Любой химический абсорбент, кроме воды, требует герметической системы и, если образующийся в ходе реакции продукт не является ценным веществом – регенеративности цикла. Воду же можно использовать в простых скрубберах с меньшей опасностью утечки и во многих случаях без рециркуляции со сбросом насыщенного раствора.

Воду можно применять также для промывки газов высокого давления, если растворимость примеси, например CO_2, умеренная при низком давлении, увеличивается до высокого, экономически выгодного уровня при значительном ее парциальном давлении.

Абсорбцией воды в промышленных системах очистки удаляют аммиак (NH_3), сернистый ангидрид (SO_2), двуокись углерода (CO_2), водород (H_2), фтористые соединения (HF), четырехфтористый кремний (SiF_4), хлористый водород (HCl) и хлор (Cl_2). Водная абсорбция аммиака (и других азотистых оснований) из газов не имеет большого значения как процесс очистки газа, кроме очистки коксового и некоторых других газов, в которых присутствуют также H_2S и CO_2.

Водная абсорбция сернистого ангидрида (SO_2) является основой процесса, применяемого в промышленном масштабе для очистки дымовых газов (процесс Баттерси).

Однако в этом случае в качестве абсорбента используют щелочную воду.

При абсорбции H_2S, CO_2, фтористого водорода, четырехфтористого кремния, хлористого водорода и хлора в водном растворе образуются кислоты, поэтому возникает проблема – защита аппаратуры от коррозии.

Однако коррозионные свойства этих веществ отнюдь не одинаковы и, кроме того, для их извлечения требуются различные процессы. CO_2, H_2S и Cl_2 практически не растворимы в воде и скорость их абсорбции определяется в основном сопротивлением жидкой пленки. Хотя H_2S значительно лучше растворяется в воде чем CO_2, водная абсорбция не нашла широкого промышленного применения для извлечения H_2S из газовых потоков.

Это объясняется тем, что парциальное давление H_2S в газе обычно недостаточно велико для эффективной абсорбции. Использованию этого процесса препятствует также требование к степени очистки газа от H_2S и невозможность применения воздуха для десорбции раствора из-за протекания побочных реакций.

Некоторые другие виды абсорбентов

В таблице 1 приводятся некоторые виды абсорбентов, наиболее часто применяемых для очистки отходящих газов.

Процесс абсорбции – это процесс разделения бинарных или многокомпонентных газовых смесей, осуществляемый путем избирательного поглощения отдельных компонентов смеси жидким

поглотителем – абсорбентом, в результате контакта неравновесных потоков газа и абсорбента.

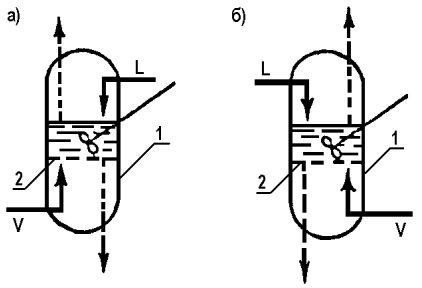


Рис.2. Принципиальные схемы: а) абсорбции; б) десорбции газов: 1 – смеситель-сепаратор; 2 – контактное устройство; ⟶ – исходные неравновесные потоки газа и жидкости; ⇢ – уходящие после контакта потоки газа и жидкости.

Характерной особенностью процесса абсорбции является независимое от газа формирование потока абсорбента и наличие в нем более тяжелолетучих компонентов, чем в газе (рис.2, а). После контакта неравновесных потоков газа и жидкости газ обогащается легколетучими, а жидкость – тяжелолетучими компонентами за счет перехода главным образом тяжелолетучих компонентов из газа в жидкость.

На практике используются также процессы десорбции и отпарки (рис.2, б), предназначенные для выделения легколетучих компонентов из жидкости путем взаимодействия неравновесных

Таблица 1. *Виды абсорбентов для очистки промышленных газов.*

№ п/п	Поглощаемые компоненты	Абсорбенты
1	**2**	**3**
1.	Оксид углерода CO	– Жидкий азот; медно-аммиачные растворы $[Cu(NH_3)]_n$, COCH;
2.	Диоксид углерода CO_2	– Водные растворы Na_2CO_3, K_2CO_3, $NAOH$, KOH, $Ca(OH)_2, NH_4(OH)$; – Этаноламины RNH_2, R_2NH_4;
3.	Сероводород H_2S	– Водный раствор $Na_2CO_3 + Na_3AsO_4$ (Na_2HASO_3); – Водный раствор AsO_3 (8 – 10 г/л) + NH_3 (1,2 – 1,5 г/л) + $(NH_4)_3AsO_3$ (3,5 – 6 г/л); – Моноэталомин (10 – 15% раствор); – Растворы K_3PO_4 (40-50%), NH_4OH, K_2CO_3, Na_2CO_3;
4.	Диоксид серы SO_2	– Вода, водные растворы: Na_2SO_3 (18 – 25%); – $NH_4(OH)$ (5 – 15%); $Ca(OH)_2$; Na_2CO_3 (15 – 20%); – $NaOH$ (15 – 25%); KOH; $(NH_4)SO_3$ (20 – 25%); – $ZnSO_3$, K_2CO_3; – Суспензии CaO, MgO, $CaCO_3$, ZnO, золы; – Ксилидин – вода в отношении 1:1; диметиланилин $C_6H_3(CH_3)_2NH_2$;
5.	Оксид азота NO	– Растворы $FeCl_2$, $FeSO_4$, $Na_2S_2O_3$, $NaHCO_3$, Na_2SO_3, $NaHSO_3$;
6.	Хлор Cl_2	– Растворы $NaOH$, KOH, $Ca(OH)_2$, Na_2CO_3, K_2CO_3, $MgCO_3$, $CaCO_3$, $Na_2S_2O_3$;
7.	Хлористый водород HCl	– Вода, растворы $NaOH$, KOH, $Ca(OH)_2$, Na_2CO_3, K_2CO_3;
8.	Соединения фтора HF, SiF_4	– Вода, растворы Na_2CO_3, $NaOH$, $Ca(OH)_2$.

потоков жидкости и газа. Физической основой разделения в указанных процессах абсорбции и десорбции является массообмен между неравновесными потоками газа и жидкости: преимущественно односторонним при абсорбции и отпарке.

Области применения абсорбционных процессов в промышленности весьма обширны: получение готового продукта путем поглощения газа жидкостью; разделение газовых смесей на составляющие ее компоненты; очистка газов от вредных примесей; улавливание ценных компонентов из газовых выбросов.

Различают физическую абсорбцию и хемосорбцию. При физической абсорбции растворение газа и жидкости не сопровождается химической реакцией или влиянием этой реакции на скорость процесса можно пренебречь. Как правило, физическая абсорбция не сопровождается существенными тепловыми эффектами. Если при этом начальные потоки газа и жидкости незначительно различаются по температуре, такую абсорбцию можно рассматривать как изотермическую.

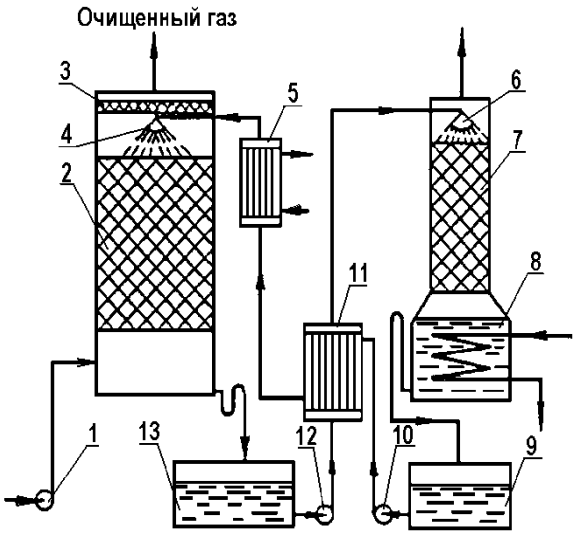


Рис.3. Принципиальная схема абсорбционной установки: 1 – вентилятор (газодувка); 2 – абсорбер; 3 – брызгоотбойник; 4, 6 – оросители; 5 – холодильник; 7 – десорбер; 8 – куб десорбера; 9, 13 – емкости для абсорбента; 10, 12 – насосы; 11 – теплообменник-рекуператор.

Основная сложность при выборе абсорбентов заключается в правильном выборе расчетных закономерностей для определения кинетических коэффициентов из большого числа различных, порой противоречивых, зависимостей, представленных в технической литературе. Расчеты по этим уравнениям, обычно справедливым для частных случаев, приводят зачастую к различающимся, а иногда к заведомо неверным результатам.

Мы рекомендуем для расчетов использовать расчетные закономерности приведенные в пособии по проектированию основных процессов и аппаратов химической промышленности [5], которые выбраны после тщательного анализа и сравнительных расчетов в широком интервале переменных, проверки адекватности расчетных данных опытным, полученным на реальных системах.

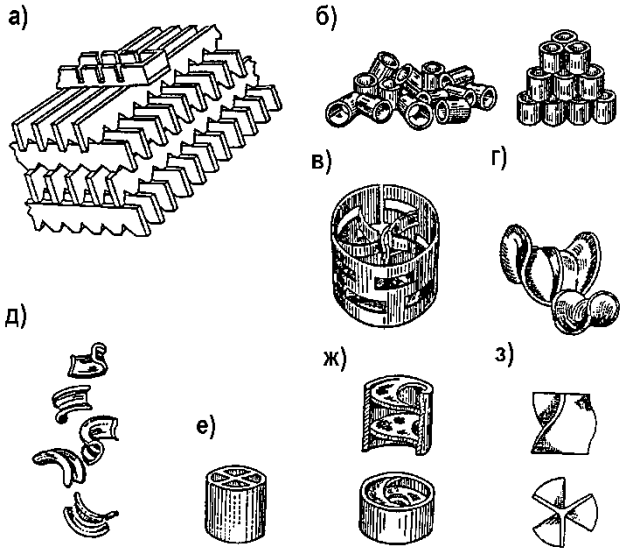


Рис.4. Виды насадок: а) – деревянная хордовая; б) – кольца Рашига внавал и с упорядоченной укладкой; в) – кольцо с вырезами и внутренними выступами (кольцо Палля); г) – керамические седла Берля; д) – седла «Инталокс»; е) – кольцо с крестообразными перегородками; ж) – кольцо с внутренними спиралями; з) – пропеллерная насадка.

На рис.3 дана схема абсорбционной установки. Газ на адсорбцию подается газодувкой 1 в нижнюю часть колонны 2, где равномерно распределяется перед поступлением на контактный элемент (насадку или тарелки). Абсорбент из промежуточной емкости 9 насосом 10 подается в верхнюю часть колонны и равномерно распределяется по поперечному сечению абсорбера с помощью оросителя 4. В колонне осуществляется противоточное взаимодействие газа и жидкости. Газ после адсорбции, пройдя брызгоотбойник 3, выходит из колонны. Абсорбент стекает через гидрозатвор в промежуточную емкость 13, откуда насосом 12 направляется на регенерацию в десорбер 7 после предварительного подогрева в теплообменнике-рекуператоре 11. Исчерпывание

поглощенного компонента из абсорбента производится в кубе 8, обогреваемом, как правило,

Таблица 2. *Характеристики насадок.*

Насадки	***a*, м²/м³**	***ε*, м³/м³**	**$d_э$, м**	**ρ, кг/м³**	**Число шт. в 1 м³**
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Регулярные насадки					
Деревянная хордовая (10 ×100), шаг в свету:					
10	100	0,55	0,022	210	-
20	65	0,68	0,042	145	-
30	48	0,77	0,064	110	-
Керамические кольца Рашига:					
50 × 50 ×5	110	0,73	0,027	650	8 500
80 × 80 × 8	80	5	0,036	670	2 200
100 × 100 × 10	60	0,72	0,048	670	1 050
		0,72			
Неупорядоченные насадки					
Керамические кольца Рашига:					
10 × 10 × 1,5	440	0,7	0,006	700	700 000
15 × 15 × 2	330	0,7	0,009	690	220 000
25 × 25 × 3	200	0,74	0,015	530	50 000
35 × 35 × 4	140	0,78	0,022	530	18 000
50 × 50 × 5	90	0,785	0,035	530	6 000
Стальные кольца Рашига:					
10 × 10 × 0,5	500	0,88	0,007	960	770 000
15 × 15 × 0,5	350	0,92	0,012	660	240 000
25 × 25 × 0,8	220	0,92	0,017	640	55 000
50 × 50 × 1	110	0,95	0,035	430	7 000
Керамические кольца Палля:					
25 × 25 × 3	220	0,74	0,014	610	46 000
35 × 35 × 4	165	0,76	0,018	540	18 500
50 × 50 × 5	120	0,78	0,026	520	5 800
60 × 60 × 6	96	0,79	0,033	520	3 350
Стальные кольца Палля:					
15 × 15 × 0,4	380	0,9	0,010	525	230 000
25 × 25 × 0,6	235	0,9	0,015	490	52 000
35 × 35 × 0,8	170	0,9	0,021	455	18 200
50 × 50 × 1,0	108	0,9	0,033	415	6 400
Керамические седла Берля:					
12,5	460	0,68	0,006	720	570 000
25	260	0,69	0,011	670	78 000
38	460	0,68	0,006	720	570 000
Керамические седла «Инталокс»:					
12,5	625	0,78	0,005	545	730 000
19	335	0,77	0,009	560	229 000
25	255	0,775	0,012	545	84 000
38	195	0,81	0,017	480	25 000
50	118	0,79	0,027	530	9 350

насыщенным водяным паром. Перед подачей на орошение колонны абсорбент, пройдя теплообменник-рекуператор 11, дополнительно охлаждается в холодильнике 5. Регенерация может осуществляться также другими методами, например отгонкой поглощенного компонента потоком инертного газа или острого пара, понижением давления, повышением температуры.

Выбор метода регенерации существенно сказывается на технико-экономических показателях абсорбционной установки в целом.

При расчетах коэффициентов массоотдачи необходимо выбрать тип насадки (рис.4) и рассчитать скорости потоков в абсорбере. При выборе типа насадки для проведения массообменных процессов руководствуются следующими соображениями [5, 6]:

– во-первых, конкретными условиями проведения процесса – нагрузками по газу и жидкости, различиями в физических свойствах систем, наличием в потоках жидкости и газа механических примесей, поверхностью контакта фаз в единице объема аппарата и т.д.;

– во-вторых, особыми требованиями к технологическому процессу – необходимостью обеспечить небольшой перепад давления в колонне, широкий интервал изменения устойчивости работы, малое время пребывания жидкости в аппарате и т.д.;

в-третьих, особыми требованиями к аппаратурному оформлению – создание единичного или серийно выпускаемого аппарата малой или большой единичной мощности, обеспечение возможности работы в условиях сильно коррозионной среды, создание условий повышенной надежности и т.д.

Примечание: а – удельная поверхность; ε – свободный объем; $d_э$ – эквивалентный диаметр; ρ – насыпная плотность; размеры даны в мм.

В химической промышленности особое значение при выборе насадки имеют следующие факторы: малое гидравлическое сопротивление абсорбера, возможность устойчивой работы при сильно изменяющихся нагрузках по газу, возможность быстро и дешево удалять с поверхности насадки отлагающийся шлам и т.д. Таким требованиям отвечают широко используемые деревянная хордовая и металлические спиральные насадки.

Различные насадки показаны на рис.4 [5, 6]. Их характеристики приведены в таблице 2.

Абсорберы

Основное требование, предъявляемое к конструкции устройства для проведения абсорбционных процессов – создание развитой поверхности контакта фаз. По способу образования такой поверхности аппараты для проведения процессов абсорбции условно подразделяются на следующие группы:

– поверхностные, в которых контакт фаз происходит на зеркале жидкости, поверхности жидкой пленки, стекающей по каналам различной формы (пленочные), элементам насадки (насадочные) или образующиеся на элементах движущихся частей (механические);
– барботажные, в которых контакт происходит на поверхности пузырьков и струй, возникающих при пропускании газа через слой жидкости в аппарате, на тарелке, в затопленной насадке, либо в пространстве с перемешивающим устройством (соответственно барботажные, тарельчатые, с подвижной насадкой, механические);
– распыливающие, в которых контакт происходит на поверхности капель распыляемой жидкости (полые, скоростные прямоточные, механические).

В качестве абсорберов в большинстве процессов очистки газа применяют аппараты – насадочные, тарельчатые или с механическим распыливанием [5, 6]. Эти абсорберы в значительной степени взаимозаменяемы, хотя некоторые особые условия того или иного процесса могут обуславливать предпочтительность одного из них перед другими.

Насадочные абсорберы предпочтительнее для небольших установок по очистке газа, при работе в условиях коррозии, при наличии жидкостей, склонных к вспениванию, при высоких соотношениях жидкость-газ, а также в тех случаях, когда желательно небольшое гидравлическое сопротивление системы. В промышленности чаще всего применяют насадки следующих типов: кольца Рашига (керамические, графитовые, стальные), шары из губчатой резины. Выбор насадки зависит от условий проведения очистки газов. Так, при абсорбции хорошо растворимых газов, когда применимы большие скорости движения потока, целесообразно использовать более крупные насадки, и наоборот, при работе под небольшим давлением (близким к атмосферному) для оптимизации потерь давления более оправдано применение регулярной насадки.

Часто более экономичны тарельчатые аппараты, поскольку в них обычно допускаются более высокие скорости газа, что позволяет уменьшить

диаметр аппарата.

Абсорберы с механическим распыливанием применяются в основном в тех случаях, когда решающее значение имеет гидравлическое сопротивление и когда в газе содержатся твердые частицы.

В последние годы среди барботажных абсорберов появились интенсифицированные аппараты – высокоэффективные аппараты с подвижной насадкой.

На рис.5 изображены аппараты с подвижной насадкой, которые весьма эффективны в процессах очистки газов больших объемов.

При взаимодействии газожидкостных потоков в слое подвижных тел создаются исключительно благоприятные условия для турбулизации в трехфазной системе (степень турбулизации в 10-15 раз выше по сравнению с барботажными аппаратами обычных конструкций). Это дает возможность проводить процесс очистки при скорости газов v = 4,0 – 4,5 м/с (с каплеуловителем v = 8 м/с) в противоточных конструкциях и при 2 – 20 м/с – в прямоточных модификациях аппаратов с регулярной подвижной насадкой. Опыт эксплуатации газоочистителей с подвижной насадкой в химической промышленности показал, что степень очистки в них может достигать 0,97 – 0,99, причем из-за незабиваемости твердыми примесями их в равной мере можно использовать как абсорберы, пылеуловители и охладители.

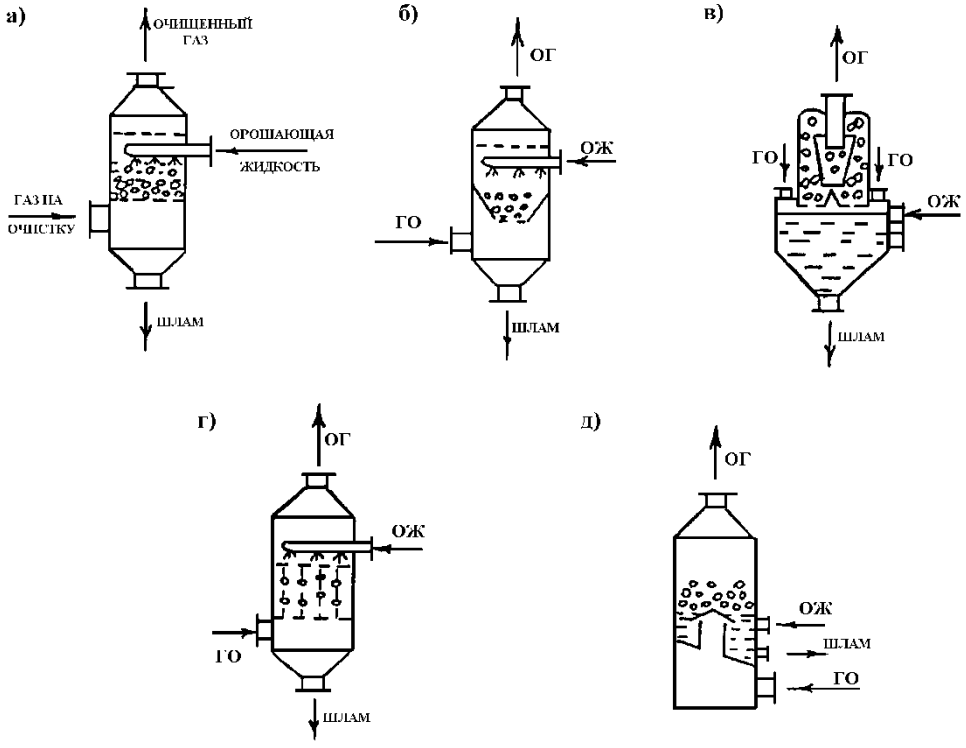


Рис.5. Типы абсорберов с подвижной насадкой: а) со взвешенной; б) с фонтанирующей; в) с циркулирующей; г) с регулярной подвижной; д) с комбинированной.

Абсорбер со взвешенной насадкой (рис.5, а) состоит из цилиндрического или прямоугольного корпуса, снабженного коническим днищем и крышкой, патрубками для ввода и вывода газа, а также штуцерами для подачи орошающей жидкости и слива шлама. Внутри аппарата установлена опорно-распределительная решетка, на которой размещена подвижная насадка. Над слоем насадки закрепляют ороситель и каплеуловтель.

Абсорбер работает следующим образом. Газ для очистки поступает через патрубок в нижнюю часть аппарата, проходит через отверстия опорно-распределительной решетки, на которую одновременно через ороситель подается орошающая жидкость. Под действием динамического напора газа слой насадки приходит во взвешенное состояние и на опорно-распредели-тельной решетке образуется сильно турбулизованный газожидкостный слой, в котором происходит интенсивный процесс массобмена. Уносимая жидкость отделяется в каплеуловителе, а очищенный газ удаляется через патрубок в верхней части аппарата. Отработанная жидкость отводится через штуцер в нижней части аппарата.

Аппараты со взвешенной насадкой наиболее распространены и от противоточных абсорберов

других классов они отличаются тем, что элементы насадки, находясь во взвешенном состоянии, совершают хаотичные и пульсационные движения. В объеме газожидкостного слоя направление движения и длина пути пробега каждого элемента насадки носят равновероятностный и случайный характер. Наряду с общеизвестными и наиболее изученными аппаратами со взвешенной насадкой созданы их конструктивные разновидности, в которых с помощью продольно-поперечного секционирования улучшена однородность взвешивания и структура газожидкостного слоя.

Аппараты со взвешенной насадкой подразделяют на подклассы: абсорберы со взвешенной насадкой и секционные абсорберы со взвешенной насадкой. К аппаратам со взвешенной насадкой относятся газоочистители, известные в литературе под названием «турбулентный контактный абсорбер», «скруббер с плавающей насадкой», «пенный аппарат со взвешенной насадкой» и др., в которых над опорно-распределительной решеткой в рабочей зоне находятся только элементы насадки без дополнительных приспособлений.

В секционированных абсорберах со взвешенной насадкой используют различные перегородки, вставки, стабилизаторы или сетки большого свободного сечения, которые делят рабочую зону на отдельные секции. В аппаратах этого подкласса облегчается масштабный переход к промышленным колоннам без снижения эффективности массообмена.

В абсорберах с подвижной насадкой наряду с плоскими применяют и другие виды тарелок (опорно-распределительных решеток), например волнообразные, гофрированные и т.д. Одна из подобных конструкций – тарелка в форме усеченного конуса. В такой тарелке перфорирована только часть поверхности, чаще всего нижнего основания конуса. Из-за сужения сечения тарелки скорость течения газа через нее намного выше, чем в обычных решетках, в силу чего происходит фонтанирование насадки над перфорированной частью тарелки. У неперфорированной периферийной области тарелки слой насадки скатывается вниз по наклонной поверхности конуса. Таким образом, в центре аппарата наблюдается восходящее фонтанирующее движение элементов насадки, а у стенок – нисходящее.

Абсорберы с фонтанирующей насадкой имеют вместо конусной тарелки зигзагообразную тарелку (рис.5, б). Принцип работы абсорбера с фонтанирующей насадкой аналогичен принципу абсорбера со взвешенной насадкой.

Абсорберы с циркулирующей насадкой состоят из корпуса, выполненного в виде двух коаксиально расположенных камер (рис.5, в). В первой камере, предназначенной для удержания жидкости, предусмотрены штуцеры для ввода жидкости и вывода шлака. Во второй камере имеется опорно-распределительная решетка, над которой расположена циркуляционная труба с патрубком для вывода очищенного газа. Газ и жидкость поступают в первую камеру через патрубки.

Подлежащий очистке газ подают через патрубок в первой камере в полость, расположенную над слоем жидкости и образованную стенками первой и второй камер (кольцевое пространство). Равномерно распределенный газовый поток проходит через щель между нижней кромкой второй камеры и зеркалом жидкости, при этом интенсивно эжектирует последнюю и выходит через отверстия решетки в слой насадки. Слой насадки приходит в псевдоожиженное состояние, и в контактной зоне образуется трехфазная турбулизованная система газ-жидкость-подвижная насадка. По мере расширения псевдоожиженного слоя насадка поднимается в верхнюю часть второй камеры, где газовый поток изменяет свое направление, элементы насадки по инерции движутся в циркуляционную трубу, а очищенный газ выходит из аппарата через верхний патрубок. Элементы насадки и захваченная жидкость под действием инерции и силы тяжести опускается по трубе вниз на решетку, и процесс циркуляции продолжается.

Абсорберы с циркулирующей насадкой изготавливаются как с внутренними (в корпусе аппарата), так и с наружными циркуляционными (транспортными) трактами.

В отличие от аппаратов со взвешенной насадкой, в абсорбере с циркулирующей насадкой циркулирующее или вращательное движение осуществляется организованно с помощью дополнительных трактов (зон) и специальных приспособлений.

В абсорберах с вращающейся насадкой вращение осуществляется различными способами в рабочей зоне аппарата. Один способ – использование предварительного закрученного потока газа с помощью направленных сопел решетки. В других случаях применяют тороиды, различные типы верхних органических решеток, отражателей в виде сферы и т.д.

Абсорберы с регулярной подвижной насадкой (рис.5, г) работают следующим образом. Под действием напора газа, поступающего через нижний патрубок, гибкие струны с нанизанными на них элементами насадки совершают

колебательное движение. При этом в рабочем пространстве над распределительной решеткой образуется газожидкостный слой, в котором происходит интенсивный массообмен.

Абсорберы с регулярной подвижной насадкой подразделяют на два подкласса: конструкции со свободно насаженной на жидких струнах регулярной подвижной насадкой и конструкции с гибкими струнами с жестко закрепленной регулярной подвижной насадкой.

В абсорберах первого подкласса струны натянуты между стенками корпуса или решетками, насадка перемещается только по струне, пробег каждого элемента насадки по струне ограничен.

В абсорберах второго подкласса гибкие струны с жестко закрепленной регулярной подвижной насадкой консольно крепят с одной стороны, например, в крепежной решетке, а другой конец свободной пропускают через отверстия распределительной решетки. Упругость и гибкость струн позволяют элементам насадки совершать под действием пульсации потоков поперечные и продольные колебания.

Абсорберы с комбинированной насадкой (рис.5, д) представляют собой по конструкции абсорберы, сочетающие преимущества газоочистителей со взвешенной насадкой и газоочистительных устройств других типов. Наиболее часто встречаются комбинированные аппараты инерционного, ударного действия с несекционным абсорберами со взвешенной насадкой и сочетание абсорберов с фонтанирующей насадкой с газоочистителями скоростного типа (полый скруббер Вентури и т. д.).

Установка ИТПН

Наиболее известный газоочиститель этого класса – **аппарат с инерционно – турбулентной подвижной насадкой (ИТПН)**.

Исследования и промышленные испытания показали, что конструктивные особенности различных классов газоочистителей со взвешенной насадкой влияют на гидродинамический режим в аппаратах. Так, для газоочистителей со взвешенной насадкой и ИТПН характерны режимы стационарного состояния насадки (скорость газа до 1,5 – 2,0 м/с), начального взвешивания (выше1,5 м/с) и полного взвешивания(2,5 – 4,5 м/с). Гидродинамические режимы в аппаратах с фонтанирующей насадкой такие же, однако, скоростные процессы режимов несколько ниже. Абсорберам с регулярной подвижной насадкой присущи режимы: пленочный (скорость газа до 1,5 м/с), переходный (более 1,5 м/с) и развитой турбулентности. Наиболее выраженные гидродинамические режимы аппаратов с циркулирующей насадкой – начальная и развитая циркуляция. Расчет гидродинамических характеристик абсорберов со взвешенной насадкой (гидравлическое сопротивление, динамическая высота и газосодержание газожидкостного слоя, количество удерживаемой жидкости на решетке, динамический уровень жидкости и т. д.) приводится в [7].

При расчете эффективности массообмена в жидкой фазе в аппаратах с подвижной насадкой учитывают закономерности массоотдачи в капле и пленке жидкости.

Для расчета эффективности абсорберов используется формула:

$$\beta_{zs} = w_z \ln(C_н / C_к), \qquad (4)$$

из которой определяют конечную концентрацию $C_к$ при известном содержании $C_н$ абсорбируемого газа.

Степень абсорбации:

$$\eta_a = [(C_н - C_к) / Cн] \cdot 100\% . \qquad (5)$$

Скорость газа выбирают, исходя из создания устойчивой и эффективной работы аппарата, т.е. в пределах 3,0 – 4,0 м/с для конструкций абсорберов со взвешенной насадкой, ИТПН и абсорберов с регулярной подвижной насадкой; 1,5 – 4 м/с для конструкций абсорберов с фонтанирующей насадкой и 3,0 – 7,0 м для конструкции абсорберов с циркулирующей насадкой.

При скорости выше 4,5 м/с во всех аппаратах рекомендуется устанавливать центробежные каплеуловители. Скорость газа во входном патрубке аппаратов ИТПН и абсорберов с циркулирующей насадкой должна составлять $v = 18$м/с, что обеспечивает интенсивную эжекцию жидкости в слой насадки.

Плотность орошения определяют из материального баланса процесса и с учетом растворимости газа. При этом для абсорбции хорошо растворимых и среднерастворимых газов плотность орошения L =10 – 25 м³/(м² · ч).

Для плохо растворимых газов чем выше значение L, тем интенсивнее проходит процесс очистки, однако L не должна превышать 100 м³/(м² · ч).

Выбор исходного уровня жидкости. Эта величина очень сильно влияет на рабочий режим и эффективность процессов абсорбции в аппаратах и ИТПН и абсорберах с циркулирующей насадкой.

Рекомендуется принимать h_0 в пределах 0,2 м, поскольку дальнейшее увеличение уровня приводит к резкому росту энергозатрат.

Выбор насадки. В качестве насадочного элемента чаще всего используют шаровую насадку из пористой резины. Диаметр насадки d = 0,04 м, плотность ρ = 650 кг/м³. Статическая высота слоя насадки, обеспечивающая значительную эффективность очистки составляет 0,2 м.

ЛенНИИГипрохимом и Уральским НИИстромпроектом разработана универсальная установка шлакопереработки фосфорного шлака на строительные материалы. В качестве эффективного и интенсивного аппарата очистки предложен инерционно-турбулентный аппарат с подвижной насадкой (ИТПН), который должен отвечать 2-м требованиям: выполнять роль абсорбера фторгазов и достаточно надежно улавливать полидисперсную пыль, состоящую из двух основных составляющих: шлаковых возгонов (d = 1,2 – 1,4мкм) и пыль готового материала (d = 35 – 42 мкм).

Были проведены широкие исследования применяемости аппарата ИТПН в качестве абсорбера фторгазов при различных гидродинамических режимах работы аппарата с применением в качестве абсорбентов раствора соды, известкового молока и воды. Исследования показали, что эффективность улавливания паров HF в аппарате ИТПН достигает 96-99%. Основным фактором, определяющим гидродинамическую обстановку в аппарате, является скорость газа в свободном сечении аппарата. Наиболее турбулизированный пенный слой в рабочей зоне аппарата с хорошо развитой поверхностью фазового контакта создается при скорости 3-5 м/с, которую и следует считать оптимальной. В выбранных условиях эффективность аппарата мало зависит от природы абсорбента. Это объясняется, по-видимому, тем фактором, что фтористый водород хорошо растворяется в исследованных средах и процесс абсорбции лимитируется лишь скоростью диффузии молекул к поверхности раздела фаз.

Исследования зависимости эффективности абсорбции от высоты статического слоя насадки – $H_{ст}$ и исходного слоя жидкости показали, что оптимальное значение $H_{ст}$ = 120 – 180 мм. Уменьшение $H_{ст}$ снижает турбулизацию газожидкостного слоя и, следовательно, уменьшает эффективность абсорбции. Оптимальный уровень абсорбента в аппарате соответствует уровню входного газового патрубка либо на 20-30 мм выше, что отвечает максимальным значениям эффективности. В качестве насадки использовались шары из губчатой резины d = 40 мм и насыпной массой 600-800 кг/м³. Свободное сечение опорно-распределительной решетки составило более 50%. Гидравлическое сопротивление аппарата 2400 – 2500 Па. В таблицу 3 включены данные исследований эффективности аппарата ИТПН.

***Таблица 3**. Результаты исследований аппарата ИТПН.*

Получаемый продукт и абсорбент	Компоненты выбросных газов	Концентрация, мг/м³	Эффективность очистки, %
1. Литой щебень (Абсорбент – вода)	Пыль P_2O_5 Фторгазы Соедин. серы	280 – 315 9 – 65 16 – 21	98 – 99 42 – 46 41 – 48 –
2. Зерненная пемза (Абсорбент – 2%-ное известковое молоко)	Пыль P_2O_5 Фторгазы Соедин. серы	128 – 16000 10 – 55 18 – 30 480	99 – 99,8 40 – 61 96 41 – 61

Установка для поглощения хлора

С.Т.Мирошниченко, М.М.Крастылевым и А.И.Лобановым [8] разработана установка «Поглотитель хлора», которая предназначена для очистки воздуха от хлора, поступающего в газовоздушную среду хлораторной в рабочем режиме или при аварийном выбросе хлора в случае разгерметизации контейнера.

На рис.6 приведена принципиальная схема установки.

В основу работы установки заложено распыление рабочей жидкости специальным распылительным устройством с целью генерации высокоразвитой поверхности поглощения хлора водой (процесс абсорбции) и антихлором (процесс хемосорбции) на струях и каплях в локальном объеме, образованном корпусом, эжектирование газо-воздушной среды в корпус.

При работе установки под действием струй

распылительного устройства 3 газо-воздушная среда хлораторной эжектируется в корпус устройства, где взаимодействует с высокоразвитой поверхностью тепломассообмена. Благодаря хорошей растворимости происходит абсорбирование хлора на струях и каплях рабочей воды. Отработанная рабочая вода отводится в емкость 4, откуда насосом 5 возвращается в водяной трубопровод 1. Очищенный от хлора и охлажденный воздушный поток через каплеотделитель 7 возвращается в хлораторную.

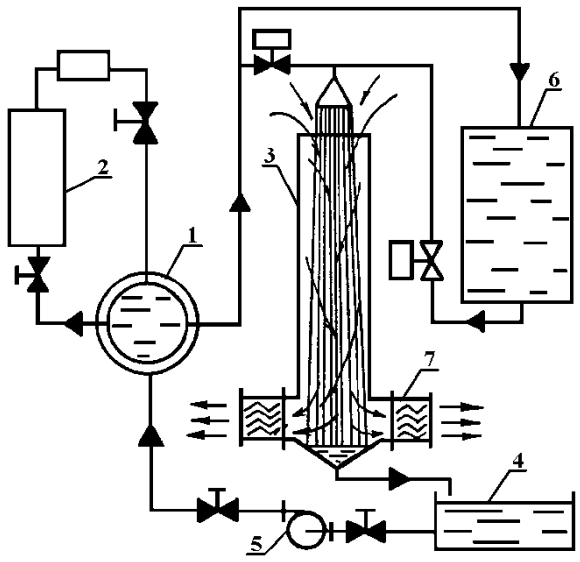


Рис.6. Принципиальная схема установки «Поглотитель хлора» [9].

При аварийном выбросе хлора (разгерметизация контейнера) в распылительное устройство 3 подается дополнительно из емкости 5 антихлор (происходит процесс абсорбции и хемосорбции). Вода с продуктами реакции собирается в цистерну 4 для дальнейшей утилизации. При таком режиме работы система возврата воды отключается.

Установка «Поглотитель хлора» позволяет:

- эффективно удалять хлор из газоводушной среды в рабочем режиме и при аварийном выбросе хлора;
- экономично производить кондиционирование воздуха хлораторной;
- продлевать моторесурс оборудования хлораторной путем исключения воздействия хлора.

Заключение

Рассмотрен широкий класс абсорбентов, прежде всего воды, как наиболее часто используемого адсорбента в химической промышленности.

Проанализированы различные типа насадок, используемых при конструировании абсорберов.

Приводятся данные по установкам. в том числе установки с инерционно-турбулентной подвижной насадкой (ИТПН), а также установка для поглощения хлора, предложенная к.т.н. Мирошниченко С.Т. [8].

Список литературы

1. Киреев В.А. Краткий курс физической химии. – М.: Химия, 1969. – 324 с.
2. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура воды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975. – 280 с.
3. Кульский Л.А. и др. Вода в атомной энергетике. – Киев: Наукова думка, 1983. – 256 с.
4. Бродский А.И. Химия изотопов. – М.: Наука, 1957. – 585 с.
5. Основные процессы и аппараты химической технологии: Пособие по проектированию. Под ред. Ю.И.Дытнерского. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
6. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. – 752 с.
7. Балабеков О.С., Балтабаев Л.Ш. Очистка газов в химической промышленности. Процессы и аппараты. – М.: Химия, 1991. – 256 с.
8. Мирошниченко С.Т., Крастылев М.М., Лобанов А.И. Коэффициент очистки прямоточного распылительного теплообменника. – Сб. научных трудов Севастопольского военно-морского инта, 1994, №3.

Reference

1. Kireev V.A. Short course of physical chemistry. - M.: Chemistry, 1969 .-- 324 p.
2. Eisenberg D., Kautzman V. Water structure. - L .: Gidrometeoizdat, 1975 .-- 280 p.
3. Kulsky L.A. and others. Water in nuclear energy. - Kiev: Naukova Dumka, 1983. - 256 p.
4. Brodsky A.I. Chemistry of isotopes. - M .: Nauka, 1957. - 585 p.
5. The main processes and apparatuses of chemical technology: Design Manual. Ed. Yu.I. Dytnersky. - M .: Chemistry, 1991 .-- 496 p.
6. Kasatkin A.G. Basic processes and apparatuses of chemical technology. M .: Chemistry, 1973.- 752 p.
7. Balabekov O.S., Baltabaev L.Sh. Gas purification in the chemical industry. Processes and apparatuses. - M .: Chemistry, 1991 .-- 256 p.
8. Miroshnichenko S.T., Krastylev M.M., Lobanov A.I. Coefficient of cleaning of a direct-flow spray heat exchanger. - Sat scientific works of the Sevastopol Naval Institute, 1994, No. 3.

УДК 629.12

Методика расчета аэродинамического сопротивления судового газоочистителя (скруббера)

С.Е. Тверская[1], В.И. Истомин[2], В.В. Хлебникова[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольского государственного университета», ул. Университетская, 33
г. Севастополь, 299029, Россия, [1]svettverskaya@mail.ru,[2,,3] v-istomina@mail.ru.

Статья поступила 24.01.2020 г.; после доработки 28.01.2020 г.

Аннотация

Одной из мер для выполнения требований международной конвенции МАРПОЛ 73/78 по предотвращению загрязнения атмосферы окислами серы является установка на газовыпускном тракте судового дизеля газоочистителя (скруббера). В данной статье приведена методика расчета аэродинамического сопротивления газоочистителя, которая позволит сделать вывод о возможности установки скруббера на газовыпускном тракте любого судового дизеля.

Ключевые слова: судовой скруббер, отработавшие газы, окислы серы, гидравлическое сопротивление.

Method for calculating the aerodynamic drag of a ship gas scrubber (scrubber)

S.E. Tverskaya[1], V.I. Istomin[2], V. V. Hlebnikova[3]
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st, c. Sevastopol,
299029, Russia, [1]*svettverskaya@mail.ru,*[2,,3] *v-istomina@mail.ru*,

Received 24.01.2020 y.; received in final form 28.01.2020 y.

Abstract

One of the measures to fulfill the requirements of the international MARPOL 73/78 convention on the prevention of atmospheric pollution by sulfur oxides is the installation of a gas scrubber (scrubber) on the gas outlet of a marine diesel engine. This article describes the method of calculating the aerodynamic resistance of a gas scrubber, which will allow us to conclude that it is possible to install a scrubber on the gas outlet of any marine diesel engine.

Keywords: ship scrubber, exhaust gases, sulfur oxides, hydraulic resistance.

Введение

Серьезнейшей экологической проблемой работы судового дизеля являются отработавшие газы, образующиеся в его цилиндрах при сжигании топлива и выбрасываемые в атмосферу.

При окислении топлива, в состав которого входят углерод, водород, кислород, азот и сера, кислородом воздуха образуются углекислый газ CO_2 (при полном сгорании топлива), оксид углерода CO (при недостатке кислорода воздуха или при плохом смесеобразовании), водяной пар H_2O, сернистый и серный ангидриды (SO_2 и SO_3), оксид и диоксид азота (NO и NO_x), углеводороды C_nH_m, альдегиды и сажа (несгоревший углерод).

Из всех перечисленных вредных выбросов наиболее токсичными являются оксиды углерода CO, азота NO_x и серы SO_x.

Содержание CO зависит от количества сжигаемого топлива, а, следовательно, снизить его можно или путем повышения экономичности двигателя, или за счет увеличения коэффициента избытка воздуха.

Сильнотоксичные оксиды азота образуются

при высокой температуре в камере сгорания дизеля, повышенные выбросы которых в атмосферу приводят к образованию азотной и азотистой кислот (кислотным дождям). Снизить их содержание в отработавших газах двигателя возможно при уменьшении его нагрузки.

При сгорании серы (окислении кислородом воздуха) образуется токсичный сернистый ангидрид SO_2 (бесцветный газ, обладающий неприятным удушливым запахом) и еще более токсичный серный ангидрид SO_3 (при дальнейшем окислении SO_2 кислородом воздуха).

Уравнения реакции имеют вид:

$S + O_2 = SO_2$, $2SO_2 + O_2 = 2SO_3$.

При взаимодействии SO_2 и SO_3 с водяным паром образуется сернистая и серная кислоты, приводящие к низкотемпературной коррозии деталей двигателя (втулок цилиндров, шеек коленчатого вала, поршневых колец, выпускных клапанах и пр.).

Уравнения реакции имеют вид:

$SO_2 + H_2O = H_2SO_3$ – сернистая кислота,

$SO_3 + H_2O = H_2SO_4$ – серная кислота.

Кроме того, выбросы окислов серы являются причиной кислотных дождей.

Количество образующихся SO_x напрямую зависит от содержания серы в топливе.

Поэтому Международная конвенция по предотвращению загрязнения с судов МАРПОЛ-73/78 ввела следующие ограничения на предельно допустимое содержание серы в топливе, сжигаемом в судовых дизелях [1].

В районах контроля выбросов SO_x и в зонах государств – членов Европейского Союза (ЕС) содержание серы в бункерном топливе допустимо в пределах 0,1%, в остальных же районах пока допускается 3,5%, а после 1 января 2020 года это содержание должно снизиться до 0,5%. При этом дизель должен обеспечивать выброс с отработавшими газами соотношения объемных концентраций SO_x (млн$^{-1}$) и CO_2 (% по объему), приведенных в таблице 1.

***Таблица** 1 Соответствие содержания серы в топливе соотношению SO_x/CO_2*

Содержание серы в топливе (% по массе)	Соотношение выбросов SO_x (млн$^{-1}$)/ CO_2 (% по объему)
3,5	151,7
1,5	65,0
1,0	43,3
0,5	21,7
0,1	4,3

Произвести мазут с содержанием серы до 0,5%, воспользовавшись технологией гидроочистки, крайне дорого. Поэтому уже сегодня нужно иметь на судне существенный запас дизельного топлива, особенно учитывая то, что зоны ЕС постоянно расширяются. После же 2020 года для бункерных компаний возможны три варианта.

Первый, и наиболее простой вариант, связан с переходом на бункеровку только дизельным топливом, что приведет к снижению затрат на бункеровку и топливоподготовку топлива (положительная сторона), но существенно увеличит материальные затраты (легкое топливо стоит в два раза дороже тяжелого).

Второй путь – переход на бункеровку сжиженным природным газом (СПГ), который соответствует всем экологическим стандартам. Недостатками данного пути является высокая стоимость переоборудования дизеля, необходимость наличия на судне низкотемпературных емкостей для хранения СПГ, слаборазвитая инфраструктура снабжения этим видом топлива в портах мира, сложная процедура передачи топлива, связанная с необходимостью продувки труб инертным газом и наличием судов-газоходов.

И третий путь – уменьшение образования окислов серы (прежде всего, содержания первичного серного ангидрида SO_2) за счет очистки отработавших газов в газоочистителях (скрубберах), устанавливаемых на выхлопном тракте двигателя.

К преимуществу данного способа относиться то, что дизель, продолжая работу на мазуте, после очистки отработавших газов будет выбрасывать в атмосферу содержание SO_2, соответствующее работе на топливе с содержанием серы 0,5 %. Недостатком же способа является достаточно большие массогабаритные показатели скрубберов и необходимость наличия квалифицированных специалистов для их эксплуатации и обслуживания.

Кроме того, любое оборудование, установленное на газовыхлопном тракте двигателя, приводит к повышению аэродинамического сопротивления, а следовательно, уменьшению мощности двигателя. Так, для ДВС общее сопротивление выпускного трубопровода не должно быть больше 4 кПа, включая сопротивления утилизационного котла (1,2 кПа), глушителя шума (1 кПа) и искрогасителя (0,1÷0,4 кПа) [2].

Так как скруббер одновременно может выполнять функции глушителя шума и искрогасителя, то его дополнительное сопротивление не должно превышать 2,8 кПа.

Таким образом, перспективным методом

снижения окислов серы в выхлопных газах является применение систем очистки с использованием судовых скрубберов при условии их аэродинамического сопротивления. не превышающего указанного выше.

Изложение основного материала

В настоящее время ряд фирм разработали системы очистки отработавших газов в которые входят судовые скрубберы (например, фирма Альфа-Лаваль и Вяртсиля).

На рисунках 1 и 2 представлены схема установки скруббера на судне и его система с боковым подводом газов фирмы Wärtsilä (Вяртсиля).

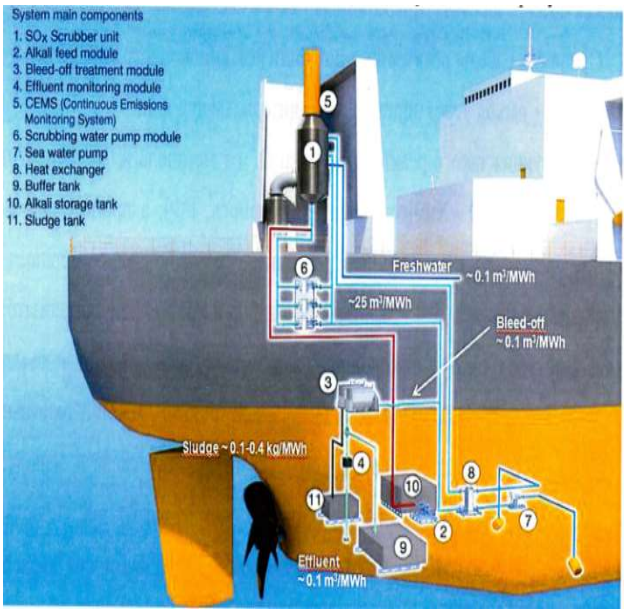


Рис. 1 Установка скруббера для очистки отработанных газов с боковым подводом газов фирмы Wärtsilä (Вяртсиля)

Скруббер работает по «мокрому» методу, суть которого заключается в химической реакции токсичных компонентов выпускных газов ДВС при пропускании их через воду, смешанную с каустической содой NaOH.

В состав системы входит цилиндрический скруббер, установленный на выхлопной трубе после утилизационного котла, и обслуживающее его вспомогательное оборудование. Внутри скруббера расположены три яруса орошения пресной водой, которая распыляется внутри корпуса с помощью форсунок.

Вода в очиститель поступает из циркуляционной цистерны с помощью насоса через охладитель. Температура воды контролируется терморегулирующим клапаном.

Каустическая сода для нейтрализации сернистой кислоты поступает в систему с помощью дозирующего насоса. Газ из выхлопной трубы направляется в газоочиститель и поднимается по его корпусу вверх. Капли водного раствора падают под действием силы тяжести навстречу загрязненному газу, смачивают твердые примеси, тем самым отделяя их от газа.

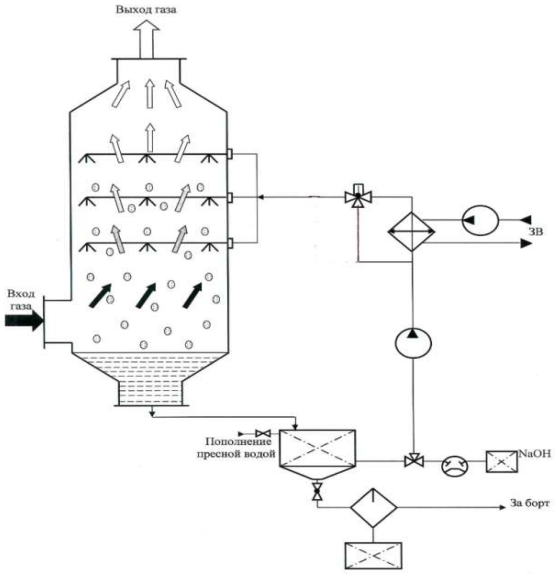


Рис.2 Система с боковым подводом газов на скруббер

При контакте раствора NaOH (едкого натра) с сернистой кислотой происходит химическая реакция, в результате которой образуются сульфиты натрия (соли) и вода в соответствии с реакцией:

$$2NaOH + H_2SO_3 = Na_2SO_3 + 2H_2O.$$

Очищенный газ отводится через газоход, расположенный в верхней части очистителя, а отработавшая вода поступает самотеком обратно в циркуляционную цистерну. Пополнение цистерны пресной водой необходимо в таком количестве, чтобы компенсировать испаренную или выброшенную влагу. Шлам, который собирается в конической части цистерны, периодически отделяется от воды в сепараторе, собирается в шламовой цистерне и сдается на утилизационные береговые станции.

Чистая вода сливается за борт. Нейтрализация и очистка производятся во время работы дизеля непрерывно.

В данной статье предлагается методика расчета аэродинамического сопротивления судовых скрубберов в связи в отсутствием ее в настоящее

время.

Методика расчета аэродинамического сопротивления скрубберов.

Исходные данные для расчета.

1. Марка ГД и его эффективная мощность N_e.
2. Механический КПД ГД $\eta_м$ (для четырехтактных среднеоборотных дизелей $\eta_м = 0{,}89 \div 0{,}91$, для двухтактных малооборотных дизелей $\eta_м = 0{,}88 \div 0{,}91$).
3. Удельный эффективный расход топлива b_e.
4. Коэффициент избытка воздуха $\propto$ (для среднеоборотных дизелей $\propto = 1{,}6 \div 2{,}0$, для малооборотных $\propto = 1{,}8 \div 2{,}2$).
5. Коэффициент продувки φ (для четырехтактных дизелей $\varphi = 1{,}05 \div 1{,}15$, для двухтактных дизелей $\varphi = 1{,}45 \div 1{,}65$).
6. Теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива G_0 $G_0 = 14$ кг/кг.
7. Температура газа на входе в скруббер $t_{г.вх}$.
8. Температура газа на выходе из скруббера $t_{г.вых}$ (должна быть не ниже 170 ^{0}С для предотвращения низкосернистой коррозии).
9. Температура воды на входе в скруббер $t_{в.вх}$.
10. Температура воды на выходе из скруббера $t_{в.вых}$ (для пресной воды допускается не выше 85 ^{0}С).
11. Диаметр входного и выходного газопровода d.
12. Диаметр $D_{АП}$ и высота H скруббера.

Методика расчета

1. Определяется индикаторная мощность ГД по формуле:

$$N_i = \frac{N_e}{\eta_м}.$$

2. Определяется удельный индикаторный расход топлива по формуле:

$$b_i = b_e \cdot \eta_м.$$

3. Определяется расход газов через скруббер.

Расход газа через скруббер равен расходу газа через турбину.

Массовый расход газа через турбину, равный сумме расходов воздуха и топлива, определяется из выражения:

$$G_г = G_{возд.} + G_т = \left(\frac{b_i \cdot N_i \cdot \propto \cdot \varphi \cdot G_0}{3600} + \frac{b_i \cdot N_i}{3600}\right), \text{кг/с}.$$

4. Определяются средние температуры газов и воды в скруббере:

$t_{г.ср} = 0{,}5(t_{г.вх} + t_{г.вых}), t_{в.ср} = 0{,}5(t_{в.вх} + t_{в.вых})$.

5. По средним температурам, используя таблицы 2 и 3, определяются необходимые для расчета теплофизические свойства сред: плотности ρ, средние массовые изобарные теплоемкости c_p, коэффициенты кинематической вязкости ν.

Таблица 2 *Теплофизические свойства газов в зависимости от температуры*

t, ^{0}С	$\rho_г$, кг/м^3	$c_{pг}$, кДж/(кг·К)	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с
160	0,789	1,02	31,01
180	0,754	1,02	33,49
200	0,722	1,03	36,03
250	0,653	1,03	42,75
300	0,596	1,05	49,87
350	0,548	1,06	57,33
400	0,407	1,07	65,22

Таблица 3 *Теплофизические свойства пресной воды*

t, ^{0}С	$\rho_в$,кг/м^3	$c_{pв}$,кДж/кг·К	$\nu \cdot 10^6$, м^2/с
10	999,7	4,191	1,306
20	998,2	4,183	1,006
30	995,6	4,174	0,805
40	992,1	4,174	0,659
50	988	4,174	0,556
60	983,1	4,179	0,478

6. Определяется объемный расход газов по формуле:

$$Q_г = 3600\frac{G_г}{\rho_г}, \text{м}^3/\text{ч}.$$

7. Определяется массовый расход воды, подаваемой в скруббер, используя уравнение теплового баланса:

$G_г c_{pг}(t_{г.вх} - t_{г.вых}) = G_в c_{pв}(t_{в.вых} - t_{в.вх})$.

Отсюда

$$G_в = \frac{G_г c_{pг}(t_{г.вх} - t_{г.вых})}{c_{pв}(t_{в.вых} - t_{в.вх})},$$

8. Определяется объемный расход воды

по формуле:

$$Q_{\text{в}} = 3600\frac{G_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}}, \text{м}^3/\text{ч}.$$

9. Определяется удельный расход воды (на 1 м^3 газа) по формуле:

$$q_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{г}}}, \text{м}^3/\text{м}^3.$$

10. Гидравлическое сопротивление (перепад давления) скруббера определяется из выражения:

$\Delta p = \Delta p_{\text{с}} + \Delta p_{\text{в}}$,

где $\Delta p_{\text{с}}$ - гидравлическое сопротивление сухого скруббера, то есть без подачи воды на орошение);

$\Delta p_{\text{в}}$, - гидравлическое сопротивление, обусловленное вводом воды на орошение.

$\Delta p_{\text{с}}$ складывается из местных сопротивлений на вход в скруббер, выход из него и сопротивления по высоте скруббера:

$$\Delta p_{\text{с}} = \zeta_{\text{вх}}\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\rho_{\text{г}} + \zeta_{\text{вых}}\frac{v_{\text{г.вых}}^2}{2}\rho_{\text{г}} + \lambda\frac{H}{D_{\text{АП}}}\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\rho_{\text{г}},$$

где $\zeta_{\text{вх}}$ и $\zeta_{\text{вых}}$ – коэффициенты местных сопротивлений на входе в скруббер и выходе из него;

λ – коэффициент гидравлического трения по высоте скруббера;

$v_{\text{г}}$ – скорость газа в скруббере.

$$v_{\text{г}} = \frac{4G_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}\pi D_{\text{АП}}^2}.$$

$v_{\text{г.вых}}$ – скорость газа в выходном газопроводе, которая может быть представлена в виде:

$$v_{\text{г.вых}} = v_{\text{г}}\frac{D_{\text{АП}}^2}{d^2}.$$

Отсюда выражение для $\Delta p_{\text{с}}$ принимает вид:

$$\Delta p_{\text{с}} = \zeta_{\text{вх}}\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\rho_{\text{г}} + \zeta_{\text{вых}}\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\frac{D_{\text{АП}}^4}{d^4}\rho_{\text{г}} + \lambda\frac{H}{D_{\text{АП}}}\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\rho_{\text{г}}$$
$$= (\zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} + \lambda\frac{H}{D_{\text{АП}}})\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\rho_{\text{г}}$$
$$= \zeta_{\text{с}}\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\rho_{\text{г}},$$

где $\zeta_{\text{с}}$ – суммарный коэффициент гидравлического сопротивления сухого скруббера.

$$\zeta_{\text{вх}} == (\frac{D_{\text{АП}}^2}{d^2} - 1)^2, \qquad \zeta_{\text{вых}} = 0{,}5(1 - \frac{d^2}{D_{\text{АП}}^2}).$$

λ определяется, исходя из числа Рейнольдса

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{г}} \cdot D_{\text{АП}}}{\nu}$$

и соотношения

$$\text{Re}\frac{\Delta}{D_{\text{АП}}},$$

где Δ - абсолютная шероховатость внутренней поверхности скруббера.

$\Delta p_{\text{в}}$определяется из выражения:

$$\Delta p_{\text{в}} = \frac{\zeta_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{в}} \cdot v_{\text{г}}^2 \cdot q_{\text{в}}}{2},$$

где $\zeta_{\text{в}}$ – коэффициент гидравлического сопротивления скруббера, обусловленного вводом воды:

$$\zeta_{\text{в}} = 0{,}63(\frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{г}}} \cdot \frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{в}}})^{-0{,}3}\zeta_{\text{с}}.$$

В качестве примера ниже приведен расчет аэродинамического сопротивления скруббера сухогруза «BBC Mississippi».

Исходные данные для расчета скруббера.

Марка ГД – 6S 46 MC-C.

Эффективная мощность N_e = 7074 кВт.

Механический КПД ГД $\eta_{\text{м}}$ 0,9.

Удельный эффективный расход топлива b_e = 0,180 кг/кВт·ч.

Коэффициент избытка воздуха $\propto$ = 2,4.

Коэффициент продувки φ = 1,7.

Теоретически необходимая масса воздуха для сжигания 1 кг топлива G_0 = 14 кг/кг.

Температура газа на входе в скруббер $t_{\text{г.вх}}$ = 250 0С.

Температура газа на выходе из скруббера $t_{\text{г.вых}}$ = 170 0С.

Температура воды на входе в скруббер $t_{\text{в.вх}}$ = 20 0С.

Температура воды на выходе из скруббера $t_{\text{в.вых}}$ = 85 ^{0}С (для пресной воды допускается не выше 85 ^{0}С).

Диаметр входного и выходного газопровода d = 0,9 м.

Диаметр скруббера $D_{\text{АП}}$ = 1,5 м.

Высота скруббера H = 2,9 м.

Расчет.

Индикаторная мощность ГД:

$$N_i = \frac{N_e}{\eta_{\text{м}}} = \frac{7074}{0{,}9} = 7860 \text{ кВт}.$$

Удельный индикаторный расход топлива:

$b_i = b_e \cdot \eta_{\text{м}} = 0{,}180 \cdot 0{,}9 = 0{,}162$ кг/кВт·ч.

Расход газа через скруббер равен расходу газа через турбину.

Массовый расход газа через турбину, равный сумме расходов воздуха и топлива, определяется из выражения:

$$G_{\text{г}} = G_{\text{возд.}} + G_{\text{т}} = \left(\frac{b_i \cdot N_i \cdot \propto \cdot \varphi \cdot G_0}{3600} + \frac{b_i \cdot N_i}{3600}\right).$$

$$G_{\text{г}} = \left(\frac{0{,}162 \cdot 7860 \cdot 2{,}4 \cdot 1{,}7 \cdot 14}{3600} + \frac{0{,}162 \cdot 7860}{3600}\right) = 20{,}2 + 0{,}35 = 20{,}55 \text{ кг/с}.$$

Средние температуры газов и воды в скруббере:

$$t_{\text{г.ср}} = 0{,}5(t_{\text{г.вх}} + t_{\text{г.вых}}) = 0{,}5(250 +$$

$170) = 210\ ^0$C,

$t_{\text{в.ср}} = 0{,}5(t_{\text{в.вх}} + t_{\text{в.вых}}) = 0{,}5(20 + 85) = 52{,}5\ ^0$C.

Теплофизические свойства при данных температурах (справочные данные):

газов: $\rho_{\text{г}} = 0{,}7$ кг/м^3; $c_{p\text{г}} = 1{,}03$ кДж/(кг·К), $\nu = 37{,}4\cdot10^{-6}$ м^2/с;

воды: $\rho_{\text{в}} = 987$ кг/м^3; $c_{p\text{г}} = 4{,}175$ кДж/(кг·К).

Объемный расход газов:

$$Q_{\text{г}} = 3600\frac{G_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}} = 3600\frac{20{,}55}{0{,}7} = 105686\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

Массовый расход воды, подаваемой в скруббер:

$$G_{\text{в}} = \frac{G_{\text{г}}c_{p\text{г}}(t_{\text{г.вх}} - t_{\text{г.вых}})}{c_{p\text{в}}(t_{\text{в.вых}} - t_{\text{в.вх}})} = \frac{20{,}55\cdot 1{,}03\cdot(250-170)}{4{,}175\cdot(85-20)} = 6{,}24\ \text{кг/с}.$$

Объемный расход воды:

$$Q_{\text{в}} = 3600\frac{G_{\text{в}}}{\rho_{\text{в}}} = 3600\frac{6{,}24}{987} = 22{,}76\ \text{м}^3/\text{ч}.$$

Удельный расход воды (на 1 м^3 газа):

$$q_{\text{в}} = \frac{Q_{\text{в}}}{Q_{\text{г}}} = \frac{22{,}76}{105686} = 0{,}000215\ \text{м}^3/\text{м}^3 = 0{,}215\ \text{л/м}^3.$$

Гидравлическое сопротивление сухого скруббера:

$$\Delta p_{\text{с}} = (\zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} + \lambda\frac{H}{D_{\text{АП}}})\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\rho_{\text{г}} = \zeta_{\text{с}}\frac{v_{\text{г}}^2}{2}\rho_{\text{г}}.$$

Скорость газа в скруббере:

$$v_{\text{г}} = \frac{4G_{\text{г}}}{\rho_{\text{г}}\pi D_{\text{АП}}^2} = \frac{4\cdot 20{,}55}{0{,}7\cdot 3{,}14\cdot 1{,}5^2} = 16{,}6\ \text{м/с}.$$

Число Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{v_{\text{г}}\cdot D_{\text{АП}}}{\nu} = \frac{16{,}6\cdot 1{,}5}{37{,}4\cdot 10^{-6}} = 666624{,}5.$$

Соотношение

$$\text{Re}\frac{\Delta}{D_{\text{АП}}} = 666624{,}5\frac{0{,}5\cdot 10^{-3}}{1{,}5} = 222.$$

где абсолютная шероховатость внутренней поверхности скруббера $\Delta = 0{,}5$ мм (сталь).

Так как $10 < \text{Re}\,\Delta/D_{\text{АП}} < 500$ расчет коэффициента гидравлического трения производим по формуле Шевелева для переходной области сопротивления:

$$\lambda = \left(\frac{1{,}5\cdot 10^{-6}}{D_{\text{АП}}} + \frac{1}{\text{Re}}\right)^{0{,}3} = \left(\frac{1{,}5\cdot 10^{-6}}{1{,}5} + \frac{1}{666624{,}5}\right)^{0{,}3} = 0{,}02.$$

Коэффициенты местных сопротивлений на входе в скруббер и выходе из него:

$$\zeta_{\text{вх}} == (\frac{D_{\text{АП}}^2}{d^2} - 1)^2 == (\frac{1{,}5^2}{0{,}9^2} - 1)^2 = 3{,}16,$$

$$\zeta_{\text{вых}} = 0{,}5(1 - \frac{d^2}{D_{\text{АП}}^2}) = 0{,}5(1 - \frac{0{,}9^2}{1{,}5^2}) = 0{,}32.$$

Суммарный коэффициент гидравлического сопротивления сухого скруббера:

$$\zeta_{\text{с}} = 3{,}16 + 0{,}32 + 0{,}02\frac{2{,}9}{1{,}5} = 3{,}52.$$

$$\Delta p_{\text{с}} = 3{,}52\frac{16{,}6^2}{2}0{,}7 = 339{,}5\ \text{Па}.$$

Гидравлическое сопротивление, обусловленное вводом воды на орошение:

$$\Delta p_{\text{в}} = \frac{\zeta_{\text{в}}\cdot\rho_{\text{в}}\cdot v_{\text{г}}^2\cdot q_{\text{в}}}{2}.$$

Коэффициент гидравлического сопротивления скруббера, обусловленного вводом воды:

$$\zeta_{\text{в}} = 0{,}63(\frac{G_{\text{в}}}{G_{\text{г}}}\cdot\frac{\rho_{\text{г}}}{\rho_{\text{в}}})^{-0{,}3}\zeta_{\text{с}} = 0{,}63\cdot(\frac{6{,}24}{20{,}55}\cdot\frac{0{,}7}{987})^{-0{,}3}\cdot 3{,}52 = 28.$$

$$\Delta p_{\text{в}} = \frac{28\cdot 987\cdot 16{,}6^2\cdot 0{,}000215}{2} = 818{,}5\ \text{Па}.$$

Полное гидравлическое сопротивление (перепад давления) скруббера:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{с}} + \Delta p_{\text{в}} = 339{,}5 + 818{,}5 = 1158\ \text{Па} = 1{,}158\ \text{кПа},$$

что не выходит за пределы 2,8 кПа

Заключение

Выполненный расчет гидравлического сопротивления скруббера позволяет сделать вывод о возможности его установки на газовыпускном тракте главного двигателя 6S 46 MC-S. И хотя скруббер имеет достаточно большие массогабаритные показатели и, на сегодняшний день, относительно высокую стоимость (3÷5 млн.$ вместе с установкой на судно), его срок окупаемости максимум 3 года.

Объясняется это следующим. В связи с нейтрализацией окислов серы, дизель может продолжать работу на дешевом тяжелом топливе и после 2020 года, выбрасывая в атмосферу содержание SOx, соответствующее работе на топливе с содержанием серы 0,5 %.

Также преимуществом скруббера является то, что он одновременно может выполнять функции глушителя шума, искрогасителя и охлади-

теля газов, исключая установку на газовыпускном тракте дополнительного оборудования.

Список литературы

1. Макаров В.В. Основы защиты воздушного бассейна: Учеб. Пособие / В.В. Макаров. – Севастополь. – Изд-во СевНТУ. – 282 с.
2. Международная Конвенция по предотвращению загрязнения с судов 1973г., измененная Протоколом 1978г. (МАРПОЛ 73/78). – СПб., ЗАО «ЦНИИМФ», 2013. -760 с.
3. Родионов, А. И. Охрана окружающей среды: процессы и аппараты защиты атмосферы: учебник для СПО / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, В. Г. Систер. — 5-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2018. — 218 с. — (Серия: Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-06146-8. — Режим доступа: www.biblio-online.ru/book/415FB6BB-D00C-4C8B-8C4D-F1B69AA9546C.
4. Леонов В. Е. Защита окружающей среды при эксплуатации судов: монография / В. И. Дмитриев. – М.: МОРКНИГА, 2017. - 252 с.

References

1. Makarov V.V. Basics of protection of the air basin: Textbook. The allowance / V.V. Ma-cars. - Sevastopol. - Publishing House of SevNTU. - 282 p.
2. The International Convention for the Prevention of Pollution from Ships, 1973, as amended by the Protocol of 1978. (MARPOL 73/78). - SPb., ZAO TsNIIMF, 2013. -760 p.
3. Rodionov, A. I. Environmental protection: processes and apparatus for protecting the atmosphere: a textbook for open source software / A. I. Rodionov, V. N. Klushin, V. G. Sister. - 5th ed., Rev. and add. - M.: Yurayt Publishing House, 2018 .- 218 p. - (Series: Vocational Education). - ISBN 978-5-534-06146-8. - Access mode: www.biblio-online.ru/book/415FB6BB-D00C-4C8B-8C4D-F1B69AA9546C
4. Leonov V. E. Environmental protection during the operation of ships: monograph / V. I. Dmitriev. - M .: MORKNIGA, 2017 .- 252 p.

УДК 631.029

Расчетно-экспериментальное исследование радиационно-защитных свойств легкоплавких композитных материалов

Н.И. Черкашина[1], В.А Ерофеев.[2], В.А.Разина [3], Д.В. Тарасевич.[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [2]selyanskij-as@ya.ru

Статья поступила 31.01.2020 г.; после доработки 03.02.2020 г.

Аннотация

Исследовано влияния различных концентраций нанопорошковлегкоплавких металлов на радиационно-защитные свойства композита.Выбран наиболее оптимальный модификатор композитного материала, улучшающий радиационно-защитные свойства –оксид меди (кратность ослабления 6,75*). Представлен физико-химический анализ некоторых порошков в составе радиационно-защитных материалов.*

*Ключевые слова:*нанопорошок, композиционные материалы, кратность ослабления, оксиды алюминия, меди и железа, экономический расчет.

Computational and experimental study of radiation-protective properties of low-melting composite materials

N.I. Cherkashina, V.A. Erofeev, V.A. Rasina, D.V. Tarasevich
[1]Scientific-educational center "Advanced technologies and materials", Sevastopol State University, 33 Universitetskaya str., 299053, Sevastopol,
Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia
[2]selyanskij-as@ya.ru,

Received 31.01.2020 y.; received in final form 03.02.2020 y.

Abstract

The influence of different concentrations of powders of low-melting metals and fusible metals on the radiation-protective properties of the composite is investigated. The most optimal modifier of the composite material, improving the radiation-protective properties – TTC annealed, (the multiplicity of attenuation 29,8). The physicochemical analysis of some powders in the composition of radiation-protective materials is presented.

Keywords:nanopowder, composite materials, attenuation ratio, the oxides of aluminium, copper and iron, economic calculation.

Введение

Для изготовления защитной одежды сотрудников, работающих в зоне действия источников излучения или радиоактивного загрязнения, используются специальные материалы, в основе может находиться резина, пластик или каучук со специальным наполнителем из соединений поглотителя [1–3].

В данной работе исследованы материалы, в основу которых входит: поливинилацетатный клей ГОСТ 30535-97, оксиды легкоплавких металлов[4–5].

Порошки, используемые в качестве модификатора, исследовали на сканирующем электронном микроскопе PHENOM proX фирмы: Phenom-World с интегрированной системой энергодисперсионного анализа. Максимальное увеличение 150 000, разрешение 10 нм, ускоряющее напряжение 5, 10, 15 кВ.

Элементный анализ исследуемых порошков

получены с применением программы ElementIdentification компании Phenom, позволяющий использовать электронный микроскоп PhenomProX для анализа образцов методом энергодисперсионного спектроскопии.

Для анализа размера, форма и морфология частиц использовали программное обеспечение ParticleMetric, позволяющая анализировать изображения частиц. На рисунках 1–4приведены фото нанопорошоковоксида железа Fe_3O_4, оксида алюминия и CuO в среде аргона.

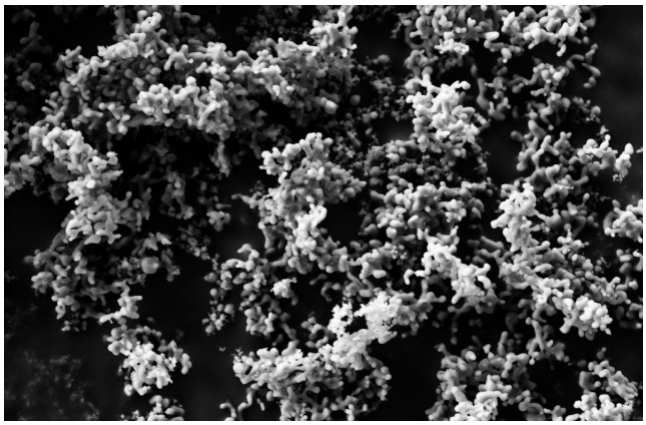


Рис.1. Фото оксида алюминия в среде аргона

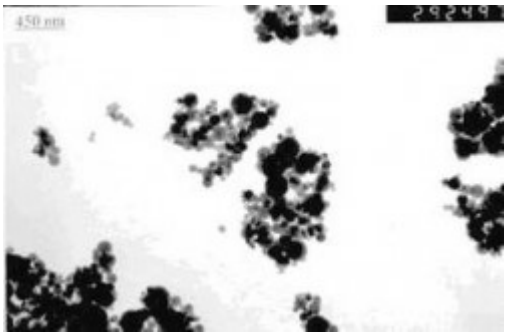


Рис.2.Фото нанопорошокаоксида железа в среде аргона

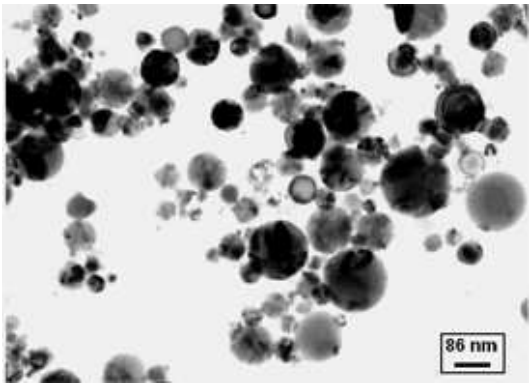


Рис.3. Фотонанопорошока оксида меди (CuO) в среде аргона

Физико-химический анализ порошков представлен в таблице 1.

Таблица 1.*Физико-химические свойства некоторых порошков легкоплавких металлов*

Товарный знак	Средний диаметр/нм	Удельная площадь/($м^2$/г)	Объемная плотность, (г/$см^3$)	Примеси	Содержание, %
FCuO-20	<30	>20	0.04~5	<0.3	<0.1, O_2
Fe_3O_4	<60	20	-	<0.5	<1, O_2
Al_2O_3	40-120	12-20	-	<0.5	Fe_2O_3: не более 0,3%; SiO_2: не более 0,2%;

Примечание: примеси включают в себя B, Al, Si, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Mo, W, P, C, S и другие элементы.

Постановка цели и задач научного исследовании

Цель работы – выбор и разработка композитного материала на основе нанопорошков с оптимальными радиационно-защитными свойствами и стоимостью.

Для достижения поставленной цели исследования в работе решаются следующие задачи:

- исследование влияния различных концентраций нанопорошков легкоплавких металлов на радиационно-защитные свойства;
- экономическая целесообразность использования композитных нано материалов.
- определены физические характеристики радиационно-защитными свойствами оксида меди.

Методика эксперимента

Измерения проводились на дозиметр-радиометре КРВП-3Б регистрирующий скорость счета (имп/с) и МКС–05М (доза). Суть эксперимента заключалась в регистрации мощности дозы в геометрии «без защиты» на расстоянии (от 1 до 10 см) от источника гама- и бета- излучения и регистрациимощности дозы «за защитой» на расстоянии 10 см от источника.

Кратность ослабления оценивалась как отношение мощности экспозиционной дозы на поверхности защиты (испытуемого образца) к мощности экспозиционной дозы после защиты[6].

Результаты исследования радиационно-защитных свойств композитных материалов модифицированных порошками легкоплавких металлов представлены в таблице 2.

***Таблица 2**. Зависимость коэффициента ослабления от % концентрации добавки модифицированных порошков легкоплавких металлов*

Металл	Содержание (%)	n (имп/с)	Коэффициент ослабление
CuO	10	5,45	4,02
	15	4,98	4,83
	20	4,43	5,12
	25	3,51	6,0
	30	3,02	6,75
Fe_3O_4	30	5,74	4,05

Таким образом, в результате исследования влияния наномодификаторов на радиационно-защитные свойства образцов, можно сделать следующие выводы: нанопрошок оксида меди 30% содержанием показали наилучшую радиационно-защитную способность по сравнению с другими легкоплавкими образцами.

Расчет стоимости изготовления на примере образцов CuO

Приведен экономический расчет стоимости изготовления образцов, который состоит из затрат на материалы и работы по изготовлению самого изделия.

Расчет стоимости изделия проводиться следующим образом:

$$C_{изд\%}=C_{св}+C_{п}+C_{рас}+C_{раб} \quad (1.1)$$

где $C_{изд\%}$ - стоимость изделия, руб/100г;

$C_{св}$ – стоимость связующего материала, руб/кг;

$C_{п}$ – стоимость порошка, руб/кг;

$C_{рас}$ – стоимость растворителя, руб/л;

$C_{раб}$ – стоимость работы затраченной на изготовление подложки, руб.

Расчет стоимости связующего материала (формула1.2):

$$C_{св}=m_{св}\cdot Ц_{св} \quad (1.2)$$

где $m_{св}$ – масса связующего вещества, кг;

$Ц_{св}$ – цена связующего вещества, кг.

Расчет стоимости порошка (формула1.3):

$$C_{п}=m_{п}\cdot Ц_{п} \quad (1.3)$$

где $m_{п}$ – масса порошка, кг;

$Ц_{п}$ – цена порошка, руб/кг.

Расчет стоимости растворителя (формула1.4):

$$C_{раств}=\rho_{раст}\cdot Ц_{раст}\cdot V_{раст} \quad (1.4)$$

где $\rho_{раст}$ – плотность растворителя, г/мл;

$C_{раст}$ – цена растворителя за 1л, руб;

$V_{раст}$ – объём растворителя, мл.

Расчет стоимости работы затраченной на изготовление подложки (формула1.5):

$$C_{раб}=n_{час}\cdot Ц_{раб} \quad (1.5)$$

где $n_{час}$ – количество времени затраченного на изготовление образца, час;

$Ц_{раб}$ – стоимость работы, руб/час.

Так как объём растворителя и время работы во всех случаях одинаковы (формула1.6).

$$\sum_{рас+раб} = C_{рас}+C_{раб} \quad (1.6)$$

где $\Sigma_{рас+раб}$ – суммарная стоимость растворителя и работы.

Отсюда: $C_{изд\%}=Ц_{св}\cdot m_{св}+Ц_{п}\cdot m_{п}+\sum_{рас+раб}$

$$C_{изд10\%}=0,09\cdot650+0,01\cdot1860+26,96=$$

$$=104,03\ ^{руб}/_{100г}$$

$$C_{изд15\%}=0,085\cdot650+0,015\cdot1860+26,96=$$

$$=110,11\ ^{руб}/_{100г}$$

$$C_{изд20\%}=0,08\cdot650+0,02\cdot1860+26,96=$$

$$=116,16\ ^{руб}/_{100г}$$

$$C_{изд25\%}=0,075\cdot650+0,025\cdot1860+26,96=$$

$$=122,21\ ^{руб}/_{100г}$$

$$C_{изд30\%}=0,07\cdot650+0,03\cdot1860+26,96=$$

$$=128,26\ ^{руб}/_{100г}$$

$$\sum_{C_{изд}}^{Cu}=104,06+110,11+116,16+122,21+128,26=$$

$$=580,5\ руб$$

Расчет стоимости 1 м^2 (CuO) в зависимости от процентного содержания композитного материала:

$$C_{10\%_{м^2}=}\frac{2516,54\cdot104,06}{100}=2618,71\ ^{руб}/_{м^2}$$

$$C_{15\%_{м^2}=}\frac{2516,54\cdot110,11}{100}=2770,96\ ^{руб}/_{м^2}$$

$$C_{20\%_{м^2}=}\frac{2516,54\cdot116,16}{100}=2923,21\ ^{руб}/_{м^2}$$

$$C_{25\%_{м^2}=}\frac{2516,54\cdot122,21}{100}=3075,46\ ^{руб}/_{м^2}$$

$$C_{30\%_{м^2}=}\frac{2516,54\cdot128,26}{100}=3227,71\ ^{руб}/_{м^2}$$

Результаты исследования радиационно-защитных свойств композитных материалов модифицированных порошками легкоплавких металлов представлены в таблице 3.

Таблица 3.*Зависимость коэффициента ослабления от % концентрации добавки модифицированных порошков легкоплавких металлов с привязкой к стоимости*

Наполнитель	Содержание, %	n(имп/с)	Коэффициент ослабление	Стоимость (м^2/руб)
CuO	10	5,45	4,02	2618,71
	15	4,98	4,83	2770,96
	20	4,43	5,12	2923,21
	25	3,51	6,0	3075,46
	30	3,02	6,75	3227,71
Al_2O_3	10	3,93	6,28	2523,08
	15	3,49	7,61	2627,51
	20	3,05	10,53	2731,95
Fe_3O_4	30	5,74	4,05	2423,42

Необходимые допущения при измерениях:

- источник расположен на оси детектора при измерении;
- ионизирующее излучение не поглощает слоем воздуха и не отражается от радиационно-защитного материала.

Материал диска будет влиять на коэффициент поглощения ионизирующего излучения слоем отделяющей среды, который вносит вклад в коэффициент регистрации для определения абсолютной активности источника.

Зависимости кратности ослабления от стоимости материала представлены на рисунках 4–5.

Кратность ослабления была получена путем расчета соотношения мощности дозы от препарата без слоя защитного материала к измеренной мощности дозы с защитным материалом.

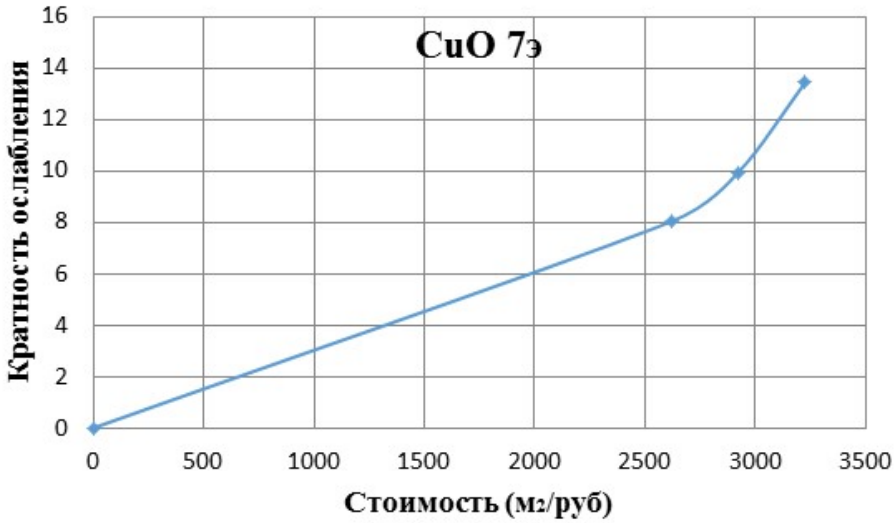


Рис.4. Зависимость кратности ослабления от стоимости композита (CuO)

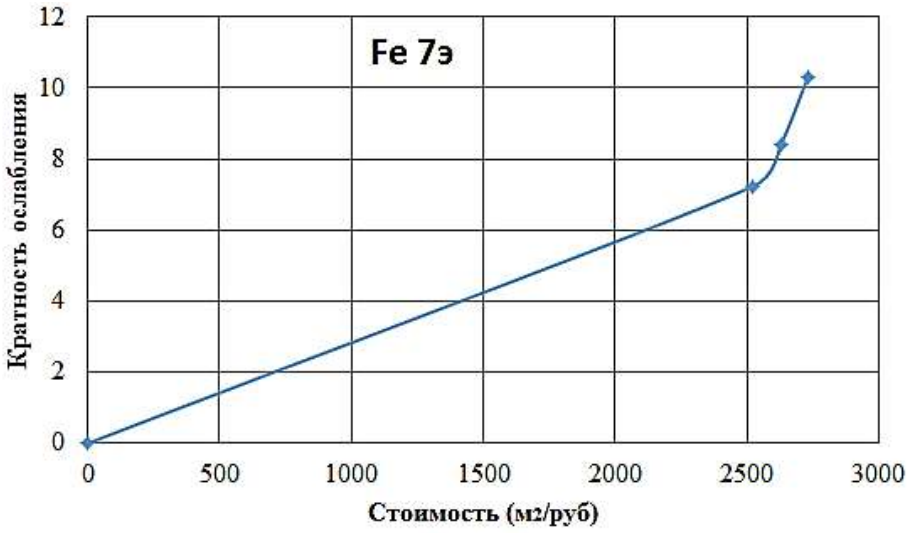


Рис.5.Зависимость кратности ослабления от стоимости композита (FeO)

Выводы

Таким образом, в результате исследования влияния наномодификаторов на радиационно-защитные свойства образцов, можно сделать следующие выводы:

- изучение кратности ослабления от стоимости композита показало, что композит на основе оксид меди 15% по стоимости равен композиту из оксида алюминия 20%, чей коэффициент ослабления больше более чем в 2 раза;
- нанопрошоки оксида меди и железа показали наименьшую радиационно-защитную способность по сравнении с оксидом алюминия 20%;
- дальнейшее увеличение концентрации наномодификаторов во всех образцах приводило к снижению коэффициента ослабления за счет эффекта отражения и возникновения ложных импульсов;
- для более детального изучения влияния наномодификаторов необходимо провести ряд исследований направленных на различные свойства композитных образцов.

Список литературы

1. Русских И.М., Селезнев Е.Н., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Экспериментально-теоретическое исследование органометаллических радиационно-защитных материалов, адаптированных к источникам излучения со сложным изотопным составом // Ядерная физика и инжиниринг, 2014, том 5, №5, с.449-455.
2. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Лукьяненко В.Ю., Михайлова А.Ф., Русских И.М., Селезнев Е.Н., Козлов А.В. Оптимизация состава радиа-

ционной защиты // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика 2015. № 4. С. 36-42.
3. Савченкова Г.А., Артамонова Т.А., Савченков В.П., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Русских И.М., Селезнев Е.Н. Перспективы использования материалов серии Абрис для радиационной защиты персонала АЭС. Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики. Сборник докладов восьмой международной научно-технической конференции 23–25 мая 2012 г. М., ОАО «Концерн Росэнергоатом», 2012.
4. P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013, v. 17(9), p. 1343-1349.
5. Н.И. Власенко, М.Н. Коротенко, С.Л. Литвиненко, В.В. Стовбун. Нейтронозащитные свойства гидридов титана и циркония с повышенным содержанием водорода // Ядерна та радіаційнабезпека. 2009, т.12, №4, с. 33-35.
6. Cherkashina N, Vladimir G., Tatyana C. Experiment – calculated investigation of composite materials for protection against radiation // Materials Today: Proceedings 11. –2019. – p. 554–560.

References

1. Russkikh I. M., Seleznev E. N., Tashlykov O. L., Shcheklein S. E. Experimental and theoretical study of organo-metallic radiation-protective materials adapted to radiation sources with complex isotopic composition / / Nuclear physics and engineering, 2014, vol. 5, No. 5, pp. 449-455.
2. Tashlykov O. L., Shcheklein S. E., Lukyanenko V. Yu., Mikhailova A. F., Russkikh I. M., Seleznev E. N., Kozlov A.V. Optimization of radiation protection composition. Izvestiya-vysheuchebnykhzavedenii. Russian. Nuclear power 2015. No. 4. p. 36-42.
3. Savchenkova G. A., Artamonova T. A., Savchenkov V. P., Tashlykov O. L., Shcheklein S. E., Russkikh I. M., Seleznev E. N. Prospects of using materials of the Abris series for radiation protection of NPP personnel. Safety, efficiency and Economics of nuclear energy. Collection of reports of the eighth international scientific and technical conference may 23-25, 2012 Moscow, "Concern Rosenergoatom", 2012.
4. P.V. Matyukhin, V.I. Pavlenko, R.N. Yastrebinskii, N.I. Cherkashina. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013, v. 17(9), p. 1343-1349.
5. N. I. Vlasenko, M. N. Korotenko, S. L. Litvi-Nenko, V. V. Stovbun. Neutron-protective properties of titanium and zirconium hydrides with increased hydrogen content / / Nuclear radiation bezpek. 2009, vol. 12, No. 4, pp. 33-35.
6. Cherkashina N, Vladimir G., Tatyana C. Experiment – calculated investigation of composite materials for protection against radiation // Materials Today: Proceedings 11. –2019. – p. 554–560.

УДК 630.867:661.183.2

Адсорбционные характеристики сорбента на основе рисовой шелухи при извлечении железа в одиночных и двоичных системах

Н.И. Черкашина
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.[1]selyanskij-as@ya.ru,

Статья поступила 03.02.2020 г.; после доработки 06.02.2020 г.

Аннотация

Определены сорбционные характеристики: коэффициент очистки, коэффициент распределения, степень извлечения ионов железа из раствора. Проведен сравнительный анализ степени извлечения железа в присутствии конкурирующих ионов. Изучена конкурентная сорбция в мульти металлических системах в присутствии тяжелых металлов Fe (III), Zn (II),), Ni (II), Pb (II) и Co (II).

Ключевые слова: фильтрация, граничные условия, ионообменные материалы, сорбция, обменная емкость, насыпная масса сорбента.

Adsorption characteristics of rice sorbent iron husks extraction in single and binary systems

N.I. Cherkashina
Sevastopol StateUniversity, 33 Universitetskayast,,Sevastopol, 299053, Russia
[1]selyanskij-as@ya.ru

Received 03.02.2020 y.; received in final form 06.02.2020 y.

Abstract

Sorption characteristics are defined: cleaning coefficient, distribution coefficient, extent of extraction of ions of iron from solution. The comparative analysis of extent of extraction of iron in the presence of the competing ions is carried out. Competitive sorption in multi metal systems in the presence of heavy metals Fe (III), Zn (II)), Ni (II), Pb (II) and Co (II) is studied.

Keywords:filtering, boundary conditions, ion exchange materials, dynamic exchange capacity, sorption, system, bulk weight of the sorbent

Введение

Среди тяжелых металлов некоторые крайне необходимы для жизнеобеспечения человека и других живых организмов, другие вызывают противоположный эффект и приводят к его отравлению или гибели.

Токсическое действие тяжёлых металлов на организм усиливается тем, что многие тяжелые металлы проявляют выраженные комплексообразующие свойства.

Присутствие железа (Fe II) в воде вредит сантехническому оборудованию и бытовой технике. Ухудшает органолептические показатели, вода имеет неприятные цвет, запах и вкус. Норма содержания железа в питьевой воде по СанПиН 2.1.4.1074 составляет 01 – 0,3 мг/л.

Железо в организме оказывает воздействие на состояние кожи, ногтей и волос, также влияет на работу щитовидной железы. Но переизбыток железа, может привести к заболеваниям сердца, развитию онкологических заболеваний, доза,

превышающая 200 мг/сутки может вызвать серьезное отравление.

Железо в соединениях, в которых находится в питьевой воде, не усваивается организмом человека, что может привести к расстройству или даже заболеваниям желудочно-кишечного тракта.

К возможным источникам загрязнения биосферы соединениями железа, меди, цинка, кобальта, титана относят: предприятия черной и цветной металлургии (аэрозольные выбросы, машиностроения (гальванические ванны меднения, никелирования, хромирования), заводы по переработке аккумуляторных батарей, автомобильный транспорт.

Целью данной работы является исследование адсорбционных характеристик органических сорбентов на основе рисовой шелухой при извлечении железа в присутствии конкурентных ионов Zn (II), Ni (II), Pb (II) и Co (II).

Существует несколько способов удаления тяжелых металлов из сточных вод (коагуляция, химическое осаждение, упаривание, электролиз, адсорбция и обратный осмос).

Однако многие традиционные технологии могут быть сложными, дорогостоящими или вредными для окружающей среды и обычно вызывают вторичные проблемы.

Поэтому среди этих процессов, адсорбция, вероятно, является наиболее привлекательной, поскольку она является простым, а также конкурентоспособным и эффективным способом [1-3]. Тем не менее, стоимость сорбента и его регенерация могут быть ограничивающим фактором.

Наряду с промышленными сорбентами, используемых для очистки водных сред сорбенты на основе лигнина обладают рядом преимуществ: лигнинсодержащее сырье является достаточно дешевым крупнотоннажным производством; приемлемые физико-химические свойства (ионообменная и сорбционная емкость, универсальность по отношению очистки от вредных примесей); низкая стоимость и не сложные технологии утилизации [4-6].

Недостатком полученных материалов является ограниченность сырьевых источников и сезонность их образования и накопления.

Для обеспечения необходимых объемов промышленных поставок фильтрующих материалов предлагается расширение материалов сырья: пентозан и лигнинсодержащие компоненты [7-9].

К ним относятся отходы после механической обработки древесины (древесная мука); стержни кукурузных початков (кукурузная кочерыжка); хлопковая шелуха; подсолнечная, рисовая, овсяная лузга; пшеничные и ржаные отруби; мякина; солома пшеницы и других злаков.

Исходя из анализа литературы можно сделать вывод, что при взаимодействии лигнин с ионами металлами образует металлкомплексные соединения, представляющие собой хелаты с координационным узлом MeO_4, где металлом выступают ионы Ni, Fe, Cu, Co, Zn, Cs, Sr.

В результате металлхелаты – металлокристалические вещества, имеющие яркую окраску, гидрофобные и нерастворимые в ацетоне, при повышении температуры до 250°С разлагаются и не плавятся.

Препараты лигнина образуют устойчивые комплексные соединения с металлами, обладающие комплексообразующими свойствами, примеры которых показаны на рисунке 1.

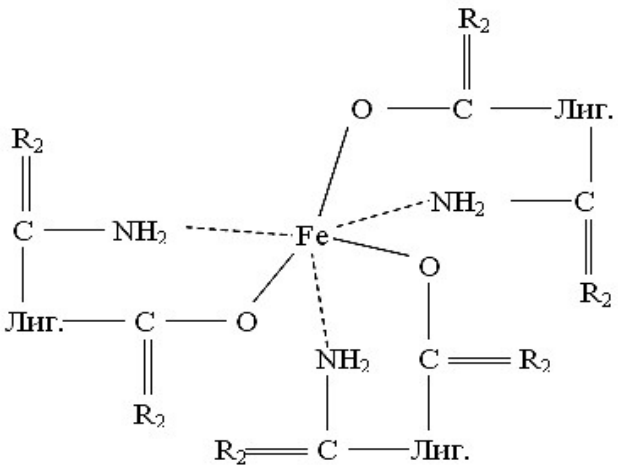


Рис.1. Структурные формулы халатов с препаратами лигнина

Взаимодействие ионов металлов с препаратами лигнина сложное и термодинамически необратимое, обуславливается процессами сорбции, окислительно-восстановительными реакциями и реакциями хелатообразования с параллельным протеканием всех процессов. В первом этапе превалирует ленгмюровская адсорбция, затем адсорбция в порах по линейному закону со следующим преобладанием процессов ионного обмена, хелатообразования и окислительно-восстановительного взаимодействия.

Ароматическая природа, многообразие функциональных групп и стандартных связей между фенилпропановыми составляющими способствуют реакционной способности лигнина.

Для решения поставленной задачи, объектом исследования выбраны обработанные меха-

нохимическими методами подсолнечная, рисовая лузга и солома пшеницы, взятая в соотношении 1:1:1 по массе, технология обработки механохимическим методом вариант opt [13].

Порядок и параметры эксперимента

За основу сорбции тяжелых металлов органическими сорбентами взята рисовая шелуха, полученная после измельчения в мельнице при переработке риса.

Проводилась механохимическая и химико-термическая обработка для подбора наилучшей модификации сорбента. Далее проводилась сорбция, определялись концентрации ионов металлов и рассчитывались сорбционные характеристики.

Рисовая зола была получена обжиганием шелухи в печи в интервале температур от 200 до 700 °С в течение 15 мин, при увеличении времени обжига, сорбент показывал наихудшие результаты сорбции катионов металлов.в тигле с крышкой для предотвращения полного сгорания в бескислородной среде.

После обжига пробы сорбент выдерживается в течение 24 часов в стандартном растворе щавелевой, далее производилась декантация и промывка до нейтральной среды на фильтре дистиллированной водой.

Сорбент был выдержан 24 часа в растворах солей исследуемых ионов металлов. Для анализа были взяты растворы ионов железа (Fe^{3+}) на растворе$FeCl_3 \cdot 6H_2O$.

Навески сорбента массой 0,1 г приводились в равновесие с 10 $см^3$ растворов с концентрацией 0,25мг/мл при 25°С на фоне постоянного значения pH. Предварительно установленное время наступления равновесия составило 2 суток. Растворы до и после сорбции анализировались на содержание ионов металлов комплексонометрическим методом.

Для быстроты определения определение концентрации ионов железа после сорбции воспользовались комплексонометрическим титрованием.

В результате механохимической обработки была получена наиболее результативная модификация рисовой шелухи. При анализе литературы, было выяснено, что основная сорбирующая составляющая рисовой лузги – лигнин.

Для получения эффективного сорбента исходный материал в безводной среде с сухими реагентами (1% оксалата аммония; 0,1 массовых % углекислого аммония; 0,5 массовых % щавелевой кислоты; 0,5 массовых % цитрата аммония; 0,1 массовых % гидроксида натрия) обрабатывают в химической мельнице в течение 15 минут.

Далее производят выгрузку целевого продукта из химической мельницы и промывают на фильтре:

I этап 0,5%-ным раствором гидроксида аммония на основе обессоленной воды, промывку осуществляют в соотношении 1:10 при нормальной температуре;

II этап промывку ведут 1% раствором щавелевой кислоты на основе обессоленной воды. Промывку осуществляют при нормальной температуре до появления прозрачного фильтрата желтоватого цвета.

После чего полученный целевой продукт подвергают сушке. В результате обработки получается фракция от 0,3 – 0,08 мм гранулированного светло коричневого цвета.

Лучшие результаты показали две модификации, полученные обжигом при 200 °С в течении 15 мин (сорбент №1), при 300 °С в течении 15 мин (сорбент №2).

Приготовление раствора железа.Железоаммонийные квасцы $Fe_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2 \cdot SO_4 \cdot 24H_2O$ (M = 964,38; Fe – 11,58 %; Fe_2O_3– 16,56 %) – крупные прозрачные кристаллы с бледно-фиолетовым оттенком. Необходимо применять свежеперекристаллизованный препарат.

Приготовление раствора из железоаммонийных квасцов. 8,634г 100 %-ного препарата необходимо растворить в небольшом количестве воды, которая содержит 10 мл концентрированной серной кислоты. При медленном растворении, раствор нагревают на водяной бане. После охлаждения раствор в мерной колбе растворяют до 1 л дистиллированной водой. 1 мл раствора соответствует 1 мг Fe^{3+}.

Методика определения концентрации ионов железа

Аликвоту 5мл рабочего раствора Fe^{3+}оттитровывают 0,1 М раствором трилона Б в присутствии сульфосалициловой кислоты, выступающей в качестве индикатора, до перехода окраски с розовой в желтую.

Концентрация Fe^{3+} определялась по формуле 1.

$$C_{(Fe^{3+})} = \frac{C_{\text{трилон Б}} \cdot V_{\text{трилон Б}}}{V_{\text{аликвоты}}} \qquad (1)$$

где $C_{(\text{ионов})}$ – концентрация ионов, мг/л;
$C_{\text{трилон Б}}$ – концентрация трилона Б, мг/л;
$V_{\text{аликвоты}}$ – объем аликвоты, мл;

$V_{трилон\ Б}$ – объем трилона Б, мл.

Определение железа (III) основано на образовании комплекса железа с комплексоном III в кислой среде. В роли индикатора выступает раствор сульфосалициловой кислоты.

Реактивы и оборудование:

- бюретки вместимостью 10, 25 см;
- пипетки вместимостью 2,5,10,25, 50;
- посуда мерная лабораторная стеклянная по ГОСТ 1770-74, вместимостью: колбы 500, 1000 см;
- цилиндры 50, 100 см
- колбы стеклянные лабораторные конические по ГОСТ 25336-82, вместимостью 250см;
- бумага индикаторная универсальная;
- термометр ртутный стеклянный лабораторный по ГОСТ 28498-90;
- кислота соляная по ГОСТ 3118-774;
- кислота сульфосалициловая по ГОСТ 4478-78;
- аммоний надсернокислый по ГОСТ 20478-75
- комплексон III, фиксанал, 0,1 н. раствор.

Все реактивы должны быть квалификации х.ч. или ч.д.а.

В коническую колбу на 250 см вносится 50 мл анализируемого раствора и разбавляется до 100 мл дистиллированной водой. Уровень pH доводится до 2 раствором соляной кислоты 1:5, значение pH определяется по универсальной индикаторной бумаге. Содержимое колбы подогревается до 50 – 60 °С. Затем вносят 20 мг сульфосалициловой кислоты.

В присутствии железа (III) раствор окрашивается в красно-фиолетовый цвет за счет образования сульфосалицилата железа (III). Раствор титруется 0,01 н. раствором комплексона III до исчезновения розового оттенка.

Массовую концентрацию ионов железа (III), мг/мл, вычисляют по формуле

$$X = \frac{V_1 \cdot н \cdot 19}{V_2} \qquad (2)$$

где: V_1 – объем раствора комплексона III, пошедший на титрование ионов железа (III), $см^3$;

V_2 – объем пробы, взятый на анализ, $см^3$;

н – нормальность раствора комплексона III;

19 – грамм-эквивалент железа (III).

За конечный результат принимается среднее арифметическое значение трех параллельных определений, расхождения между которыми не превышают 5 %.

***Таблица 1**. Зависимости массовой концентрации и объема раствора комплексона III, пошедшего на титрование ионов железа (III) в зависимости от сопутствующего компонента смеси*

№ измерения	Ионный состав пробы	V_1, $см^3$	X, мг/мл
1	Fe^{3+}	10,3	0,058
2	$Fe^{3+}+Ni^{2+}$	43,4	0,243
3	$Fe^{3+}+Pb^{2+}$	20,5	0,115
4	$Fe^{3+}+Co^{2+}$	41,8	0,234
5	$Fe^{3+}+Cu^{2+}$	16,1	0,090
6	$Fe^{3+}+ Zn^{2+}$	18,4	0,103

Расчет адсорбционных характеристик для сорбции железа.

Расчет коэффициентов для оценки оптимальных параметров по данным из таблицы 1.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i^2 \sum_{i=1}^{n} A_{i\ эксп} -}{n\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} m_i)^2}$$

$$\frac{-\sum_{i=1}^{n} m_i^2 \sum_{i=1}^{n} m_i A_{i\ эксп}}{n\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} m_i)^2} = 0{,}0074$$

$$b = \frac{n\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i\ эксп} -}{n\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} m_i)^2}$$

$$\frac{-\sum_{i=1}^{n} m_i \sum_{i=1}^{n} A_{i\ эксп}}{n\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} m_i)^2} = 0{,}00608$$

$$b' = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i\ эксп}}{\sum_{i=1}^{n} m_i^2} = 0{,}0069$$

$$SQ=\sum_{i=1}^{n} A_{i\ эксп}^2 - a\sum_{i=1}^{n} A_{i\ эксп} - b\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i\ эксп} = =1{,}96\cdot10^{-5},$$

$$S_{YC}^2=\frac{\sum_{i=1}^{n} A_{i\ эксп}^2\ a\sum_{i=1}^{n} A_{i\ эксп} - \frac{-b\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i\ эксп}}{(n-2)} = 6{,}53\cdot10^{-6}$$

$$SQ'=\sum_{i=1}^{n} A_{i\ эксп}^2 - b'\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i\ эксп}=6{,}94\cdot10^{-5},$$

$$F=\frac{SQ' - SQ}{S_{YC}^2}=7{,}62,$$

$F(\overline{P}, f_1 = n - 1, f_2 = n - 2)$ (табличное) = 6,39.

Так как фактическое значение F> F табличное, то оценка уравнения регрессии статистически надежна.

Градуировочная зависимость определяется по формуле:

$$A_{расч}= a + b\cdot m. \quad (3)$$

Степень извлечения ионов металлов из раствора определяется по формуле 4.

$$S = \frac{(C_0-C_p)\cdot100}{C_0} \quad (4)$$

где S – степень извлечения ионов металлов из раствора, мг/г;

C_0 – концентрация исходного раствора, мг/л;

C_p – концентрация равновесного раствора, мг/л.

Далее проводится расчет сорбционных характеристик для сорбции железа.

Сначала рассчитывается коэффициент очистки, исходная концентрация железа 0,25 мг/мл, равновесная – концентрация ионов после сорбции. Коэффициент распределения находится по формуле 3.

$$E=\left(1 - \frac{1}{K_{оч}}\right)\cdot100\% \quad (5)$$

Далее рассчитывается эффективность очистки (степень извлечения металла из раствора) и степень очистки по формуле [4]. Коэффициент распределения находится по формуле [5].Данные заносятся в таблицу 2.

Таблица2. *Значения коэффициента очистки, распределения и эффективности исходя из ионного состава пробы для ионов железа*

№ измерения	Ионный состав пробы	Коч.	Е, %	K_p
1	Fe^{3+}	4,334	79,93	333,43
2	Fe^{2+}+Ni^{2+}	1,029	2,81	2,89
3	Fe^{3+}+Pb^{2+}	2,173	53,99	117,35
4	Fe^{3+}+Co^{2+}	1,068	6,37	6,80
5	Fe^{3+}+Cu^{2+}	2,778	64	177,80
6	Fe^{3+}+ Zn^{2+}	2,428	58,81	142,76

Наибольшей селективностью к ионам железа имеет сорбент на основе рисовой шелухи сорбент в присутствии ионов меди,цинка и свинца.

Выводы

Исследована эффективности сорбции органическим сорбентом на основе рисовой шелухой (RHA) при извлечении Fe (III) в присутствии тяжелых металловCu (II), Zn (II),), Ni (II), Pb (II) и Co (II).

Изучена конкурентная сорбция в мульти металлических системах, определены коэффициенты очистки и распределения для меди. Результаты исследований могут использоваться для дальнейшего изучения сорбционных характеристик органических сорбентов в сложных смесях.

Список литературы

1. Черкашина Н.И. Оценка эффективности новых сорбционных материалов при очистки водных

сред/ В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. - 2019. - Т.5.№ 1. - С. 115 – 121.
2. Черкашина Н.И. Характер зависимости эффективности очистки дезактивационных вод сорбентом «Фолиокс-КГО» при изменении концентрации солей и поверхностно активных веществ / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев, В.Б. Копарушкина //Зб. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2010. –Вып. 1 (33). – С. 90 – 95.
3. Черкашина Н.И. Выбор комбинации фильтрующего материала в зависимости от технологических параметров процесса и очищаемой среды/ Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. - 2018. - Т.4.№ 3. - С. 92-98.
4. Пат. 78908 Украины, МПК51 B 01 J 20/22 (2006.01). Технология производства сорбента на основе лигнина (патент на изобретение) / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофееф.; заявитель и патентообладатель Севастопольский нац. ун–т ядерной энергии и промышленности. – № u 2012 09109; заявл. 10.04.2013; опубл. 12.07.13, Бюл. № 7. – 5 С.
5. Черкашина Н.И. Очистка сточных вод от ионов металлов сорбентами из природных материалов на основе лигнина / Н.И. Черкашина, А.С. Черкашин, И.И. Марончук // Новый университет. Серия: Технические науки. 2015. № 11-12 (45-46). С. 51-57.
6. Черкашина Н.И. Исследование эффективных сорбционных материалов для извлечения радионуклидов из технологических сред / Н.И. Черкашина, О.В. Ведищева // Материалам научно-практической конференции «Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности» (15 – 18 июня 2016 г., г. Севастополь). – Севастополь: СевГУ , 2016. – 356 с.
7. Черкашина Н.И. Технология получения сорбционных материалов на основе лигнина для утилизации жидких радиоактивных отходов/ Н.И. Черкашина // автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук – Севастополь: изд-во СНУЯЭиП, 2011. – С. 22.
8. Черкашина Н.И. Использование сорбентов на основе отходов переработки растительного сырья при очистке сточных вод и технологических сред / В.А. Ерофеев, Е.А. Культенко, Н.И. Черкашина // Экологическая безопасность. - 2013. - № 2 (16). - С. 89-92.
9. Черкашина Н.И. Научные аспекты и технико-экономические характеристики сорбентов типа «Фолиокс» / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Естественные и технические науки. - 2019. -№3 (129). - С. 52-54.
10. ЕрофеевВ.А. Выделение урана из технологических сред сорбентом на основе лигнина / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т.4.№ 4. – С. 121 – 126.
11. Черкашина Н.И. Конкурентная сорбция лигниновых препаратов для очистки сточных вод. / А.В.Любушкина, А.О.Литвинова, Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. – 2018. –Т.4. № 2. –С. 109-115.
12. Черкашина Н.И. Разработка перспективных сорбентов на основе органического сырья для извлечения тяжелых металлов / А.В.Любушкина, Н.И. Черкашина // Энергетические установки и технологии. – 2018. – Т.4.№ 2. – С. 103-109.
13. Способ получения селективного сорбента патент на изобретение № 2015119875 / В.А. Ерофеев, Э.А. Культенко, И.И. Пилипченко - заявл. 26.06.2015; опубл. 9.07.2016.

References

1. Cherkashina N. I. Evaluation of the effectiveness of new sorption materials for water purification / V. A. Erofeev, N. I. Cherkashina / / Power plants and technologies. - 2019. - Vol.5. No. 1. - P. 115 – 121.
2. Cherkashina N. I. The nature of the dependence of the cleaning efficiency of decontamination water sorbent "Felix-KGO" when you change the concentration of salts and surfactants / N. I. Cherkashin, V. A. Erofeev, V. B. Caporuscio // zbornik scientific papers SNUE and I. Sevastopol: SNUEI, 2010. V. 1, N 33. - P. 90 – 95.
3. Cherkashina N. And. Select the combination of filter material depending on the technological parameters of the process and clean up the environment/ N.And. Cherkashin // Energy and technology. - 2018. – Volume 4. No. 3. - P. 92-98.
4. Cherkashina N.I., Erofeev V. A., Pat. 93824 Ukraine, IPC 51 B 01 J 20/22, B 01 J 20/30, C 02 F 1/28. Metodproizvodstvamodificirovannogokostochkovogosorbenta “Foliox- MSP” [A method of producing stone of the modified powder of organic sorbent "Foliox- MSP"]; the applicant and patentwinner of Sevastopol national University of nuclear energy and industry № A 2010 04280; - 13.04.2010 ; publ. 12.07.10. – P 5.
5. Cherkashina N.I., Cherkashin A. S, Maronchuk I. I. Ochistkastochnixvodotionovmetallovsorbentamiizprirodni[materialovnaosnovelignina [Wastewater treatment from metal ions by sorbents from natural materials based on lignin] New University. Series: Technical Sciences. 2015. No. 11-12 (45-46). S. 51-57.
6. Cherkashina N.I., Vedischeva V.A. Issledovanieeffectivnostisorbcionnixmaterialovdljaizvlechenijzradionuclidoviztexnologicheskijsred [The study of effective sorption materials for extraction of radionuclides of technological environments Materials of scientific-practical conference "Topical issues of nuclear-chemical technologies and ecological safety" (15 – 18 June 2016, Sevastopol). –Sevastopol: SevGU, 2016. – 356 p.
7. Cherkashina N.I. Texnologijapolychenijzsorbcion-

nixmaterialovnaosnovelig-ninadljaytilizaciijidkihradioaktivnixotxodov[The technology of obtaining sorption materials based on lignin for utilization of LRW] The dissertation on competition of a scientific degree of candidate of technical Sciences – Sevastopol: publishing house SNUNE and industry 2011. – P. 22.

8. Cherkashina N.I., Erofeyev V.A, Kultenko E.A. ispolzovaniesorbentovnaosnoveothodovpererabot-kirastitelnogosirjzpriochistkestochnixvod I tehno-logicheskixsred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purifi-cation of wastewater and technological environ-ments.] Environmentalsafety, 2013, theIssueVol. 2(16) – Pp. 89-92.
9. Cherkashina N. And. The scientific aspects and technical-economic characteristics of the sorbents of the type "Folyox" / V. A. Erofeev, N. And. Cher-kashin // Natural and technical Sciences. - 2019. - No. 3 (129). - P. 52-54
10. Erofeev.A. Isolation of uranium from technological media by sorbent on the basis of lignin / V. A. Erofeev, N. I. Cherkashina / / Energy conditions and technologies. – 2018. - Vol. 4. No. 4. – S. 121 – 126.
11. Cherkashina N. I. Competitive sorption of lignin preparations for wastewater treatment./ A. V. Lyu-bushkina, A. O. Litvinova, N. And. Cherkasy-to // Energy and technology. – 2018. - Vol. 4. No. 2. –P. 109-115.
12. Cherkashina N. Development of promising sorbents based on organic raw materials for the extraction of heavy metals / A.V. Lyubushkina, N. I. Cherkashina // Power plants and technologies. – 2018. - Vol. 4. No. 2. – P. 103-109.
13. Erofeev V. The method of obtaining selective sorbent patent for the invention № 2015119875 / V. A. Erofeev, E. A. Kolchenko, I. I. Pilipenko - Appl. 26.06.2015; publ. 9.07.2016

УДК 630.864.3

Оценка эффективности фильтрации сорбентов на основе органического сырья

Н.И. Черкашина
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.[1]selyanskij-as@ya.ru,

Статья поступила 06.02.2020 г.; после доработки 10.02.2020 г.

Аннотация

Произведен предварительный расчет процесса фильтрации с использованием сорбентов на основе органических материалов при помощи математического описания. Полученные результаты позволяют без проведения натурных испытаний на объекте делать выводы о изменения характеристик материала, их зависимость от параметров среды, позволяет учесть формальную кинетику фильтрации, произвести начальное и оперативное тестирование сорбентов.Произведен анализ процесса фильтрации пористых материалов.

Ключевые слова: фильтрация, коэффициент проницаемости, органические сорбенты, лигнин, пористые материалы.

Assessment of the efficiency of filtration of sorbents based on organic raw materials

N.I. Cherkashina
Sevastopol StateUniversity, 33 Universitetskayast,,Sevastopol, 299053, Russia
[1]selyanskij-as@ya.ru

Received 06.02.2020 y.; received in final form 10.02.2020 y.

Abstract

A preliminary calculation of the filtration process using sorbents based on organic materials was made using a mathematical description. The results obtained allow us to draw conclusions about changes in the material characteristics and their dependence on the environment parameters without conducting full-scale tests on the object. this allows us to take into account the formal kinetics of filtration, and perform initial and operational testing of sorbents.The analysis of the filtration process of porous materials is made.

Keywords:filtration, permeability coefficient, organic sorbents, lignin, porous materials.

Введение

Очистка водных сред является актуальной задачей, применение технологий обработки сорбентами жидких сред позволяет обеспечить глубокую очистку и возвратить в производство ценные продукты, такой механизм используется на целом ряде предприятий машиностроения и металлообработки. Универсальный сорбента до сих пор не найден и ученые продолжают изучение методов получения новых высокоэффективных сорбентов из природного сырья. Разнообразие методов модификации природного сырья не только решает проблему с отходами, но позволяет изменить структуру адсорбента, повысить его пористость, удельную поверхность и адсорбционную емкость и улучшить кинетические характеристики.

Многие исследования проведены в стационарных условиях и позволяют судить об эффективности применения данного сорбента для очистки промышленных стоков. Для того чтобы

иметь достоверные результаты о материале фильтра в промышленной установке необходимо с помощью математической модели, которая учитывала бы кинетику процесса фильтрации получить предварительную оценку возможного использования предлагаемого сорбента.

Целью данной работы является исследование процесса фильтрации с использованием природных сорбентов при помощи математической модели без проведения натурных испытаний на объекте.

Предложенное математического описания процесса фильтрации должно давать оценкудиапазонам варьирования параметров, влиянию основных режимных параметров на рабочие области процесса.

Для реализации цели были решены следующие задачи:

- исследовались сорбционные характеристики и параметры работы большого спектра сорбентов на природной основе и наиболее распространенных фильтрующих материалов для очистки технологических сред (природные материалы на основе лигнина, а так же композиты и АУ), подходящих для процесса фильтрации в динамических условиях;
- расчетно-экспериментальным методом определены предельные диапазоны работы системы в зависимости от типа сорбционного материала для конкретной технологической среды в зависимости от ее состава.

Процесс фильтрации часто встречается при очистке водных сред и любых жидких сред (передвижение нефти, миграция влаги в плодородных почвах, работа технологических устройств химических предприятий).

Фильтрация может быть вызвана различными причинами, но в основе всегда лежит движение жидкости по сложной системе разветвленных каналов, сообщающихся между собой [1]:

- действие внешних массовых сил (сила тяжести, силы инерции, электромагнитные силы) или капиллярных сил на межфазных границах;
- перепад давлений на границе среды;
- деформация пористой среды и др.

Процесс этот сложный не только по физической природе но и трудно предсказуемый из –за точно неизвестной внутренней поверхности порового пространства, т.к. она имеет случайную структуру, следовательно досконально описать движение жидкости во всех подробностях невозможно.

Как правило при исследовании крупномасштабных явлений рассматривают пористый материал как сплошную среду, которая обладает характеристиками (плотность и давление жидкости в порах, поверхность и диаметр пор рисунок 1), в результате получают осредненные результаты в каждой точке, содержащей достаточно большое число пор [1].

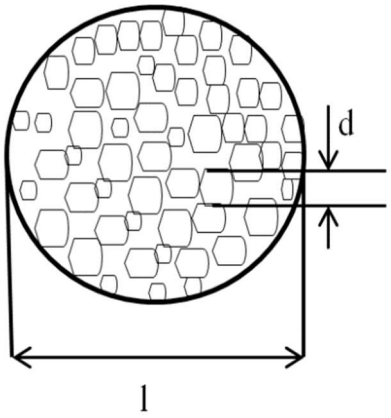


Рис.1.Схема пористой среды.

Рассмотрим движение жидкости через пористый пласт на рисунке 1 характерный размер пор d (десятые или сотые миллиметра) много меньше характерного размера пористого пласта L (метры). В этом случае, целесообразен переход от описания течения на микроуровне (внутри поры) к рассмотрению на макроуровне, учитывая, что среднее давление P жидкости в порах (в некотором месте внутри пласта в момент времени) будет осредненным давлением в поровом пространстве. Учитывая, что внутри достаточно малый объем, размеры которого будут много меньше L и много больше d (сантиметры): $d < l < L$.

Основной величиной, которая характеризует пористую среду, является пористость или порозность m (ε), она равна относительной объемной доле порового пространства в материале. Через нее можно определить количество жидкости, которое может содержаться в некотором объеме пористой среды при условии, если жидкость полностью заполняет внутри поровое пространство. Если принять объем однородного пористого материала за V и объем пор за $V_п$, то пористость этого образца выражается соотношением:

$$\varepsilon = V_п/V \qquad (1)$$

Пористость как правило безразмерная величина, значения ее обычно находятся в интервале от 0 до 1. Например значение этой величины для почв лежит в диапазоне от 0,3 до 0,7, речного песка – 0,3 – 0,55, нефтегазоносных пластов от 0,1 до 0,2. Если в пористом материале часть пор изолирована от остального связного порового пространства или заполнена другой средой (например, воздухом, раствором, то эти поры не участвуют в перемещении фильтруемой жидкости через пористую среду, поэтому часто используют активную (эффективную) пористость.

Величина пористости может меняться со временем, если пористый материал может деформироваться, для неоднородной пористой среды с переменными свойствами в каждой точке, ее значение будет некоторой функцией пространственных координат ε (x,y,z,t) [1].

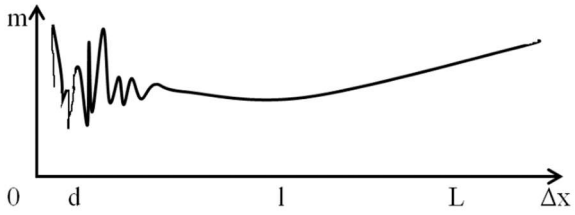


Рис. 2. Схема зависимости пористости от пространственных координат.

Используемые для исследований пористых материалы обладают неоднородными размерами (размеры пор d, размеры зерен), эти величины распределены случайным образом, т.е. плотность распределения пор по радиусам может иметь несколько максимумов. На практике, несмотря на неоднородность в геометрических размерах вводят конкретные размера среды для удобства проведения оценки при анализе уравнений.

Можно в качестве характерного размера взять величину, равную отношению объема пористого образца к площади поверхности порового пространства.

Если рассмотреть поперечный разрез пористого образца, то площадь сечения можно принять за S, часть площади за Sn , которая приходиться на поры, а площадь твердого вещества пористой среды S – Sn– на два. В этом случае просветность или поверхностная пористость n будет равна отношению площади пор в сечении к общей площади сечения и рассчитываться формулой:

$$n = Sn/S, \qquad (2)$$

Данная величина зависит от точки или направления, через которое проводится разрез пористой среды, в любом случае, среднее значение этого параметра при значительных скоростях фильтрации в параллельных сечениях фиксированного образца равнопористости этого образца.

Если обозначить цилиндрический образец пористого материала с площадью основания S и высотой h на рисунке 3, усреднить по высоте просветности n(x) в поперечных сечениях образца (ось x направлена вдоль цилиндра), тогда можно получить в среднем следующую зависимость [2]:

$$n=\frac{1}{h}\int_0^h n(x)dx=\frac{1}{S\cdot h}=$$

$$\int_0^h Sn(x)dx=\frac{1}{S\cdot h}\int_0^h S_n(x)dx=\frac{V_n}{V}=\varepsilon \quad (3)$$

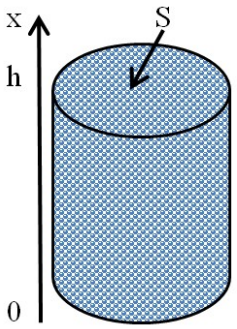


Рис.3. Схема движения жидкости через пористый образец.

Данное выражение позволяет сделать вывод, что приблизительно возможно считать просветность и пористость похожими величинами для реальных пористых сред с разнообразной структурой: $\varepsilon \approx n$.

Такие параметры как пористость, характерный размер пор, функция распределения пор по радиусам в общем случае не будут полностью отражать способность пористого материала пропускать через себя жидкость.

От свойств пористой среды зависит коэффициент проницаемости k и не зависит от свойств жидкости. Эта величина определяется геометрией порового пространства и имеет размерность площади. Его величина имеет порядок квадрата характерного размера пор D (значения проницаемости для песчаников 10−15 – 10−12 м2, для почв – 10^{-13} – 10^{-11} м^2. Для зависимости проницаемости от геометрических характеристик пористой среды предлагалось большое число приближенных формул, которые осно-

ваны на различных простых моделях внутрипорового пространства [3]. Часто используют формулу Козени – Кармана (J.Kozeny, P.C.Carman) [3]:

$$k \sim D^2 m^3/(1-m)^2, \quad (4)$$

где характерный размер пор d вычисляется как отношение объема образца к площади поверхности пор.

Для плотной упаковки одинаковых сферических частиц диаметром D справедлива приближенная формула [3]:

$$k = 2\cdot 10^{-3} D^2 \quad (5)$$

На практике часто в качестве единицы k выбирают такую проницаемость, чтобы в отсутствие тяжести при градиенте давления 1 кгс/см^3 ≈ 1 атм/см жидкость с вязкостью 0,01 г/(см·с) (вязкость воды при 20 °C) имела скорость фильтрации 1 см/с [3]. Эта единица проницаемости называется дарси 1 Д ≈ $1{,}02\cdot 10^{-12}$ м^2 ≈ 1 мкм^2 [3]. Коэффициент проницаемости является функцией пространственных координат для неоднородных пористых сред. Она может меняться с течением времени (при деформациях пористого скелета или за счет его засорения или растворения).

Закон Дарси в гидротехнической практике обычно используется в виде уравнения, разрешенного относительно скорости фильтрации, причем вместо давления используется пьезометрический напор (или просто напор) [3]:

$$H=H(x, y,z, t)=\frac{p}{\rho g}+z \quad (6)$$

где z – вертикальная координата рассматриваемой точки (ось Oz направлена вверх, противоположно g).

Выразив скорость фильтрации, получим [4]:

$$u=-C\cdot \mathrm{grad}H, \qquad C=\frac{k\rho g}{\mu} \quad (7)$$

где C – коэффициент фильтрации, зависит от свойств пористой среды, от свойств жидкости,

H – напор имеет размерность длины и равен вертикальной координате свободной поверхности жидкости.

Значения C при фильтрации воды в песке имеют порядок 10^{-5} – 10^{-2} м/с, в почве – 10^{-6} – 10^{-4} м/с, в глине – 10^{-7} – 10^{-6} м/с.

Формула определения для жидкости коэффициент проницаемости выглядит как [5]:

$$k=\frac{Q\cdot\mu\cdot L}{S\cdot\Delta P}, \quad (8)$$

где Q – объемный расход жидкости в единицу времени;

S– площадь поперечного сечения;

L – длина пути фильтрации,

P – изменение давления на входе и выходе из колонки.

Если рассмотреть насыпной ионообменный фильтр как цилиндрический объект (диаметр объекта d, длина L), то коэффициент проницаемости для пористого вещества, если разность давлений на концах объекта составляет Δp, расход жидкости в единицу времени Q, кинематическая вязкость жидкости μ, ее плотность равна p на рисунке 2.1 учитывая площадь поперечного сечения формула (9), будет иметь следующий вид (10).

Площадь поперечного сечения цилиндра при известном диаметре равна [6 – 7]:

$$S=\pi\frac{d^2}{4}, \quad (9)$$

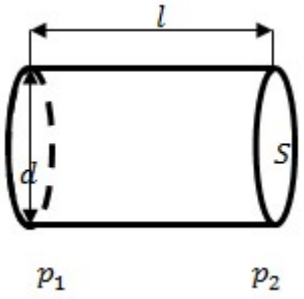


Рис.4.Цилиндрический объект

Коэффициент проницаемости для пористого вещества:

$$k=\frac{4Q\cdot\mu\cdot L}{\pi\cdot d^2\cdot\Delta P}, \quad (10)$$

Единицей измерения коэффициента проницаемости в системе СИ является: k = (м^3/с Ра с м)/Ра м^2= м^2.

Коэффициент фильтрации и коэффициент проницаемости можно выразить через соотношение:

$$\frac{k}{\mu}=\frac{K_ф}{y}, \qquad (11)$$

где $K_ф$– коэффициент фильтрации, y – удельный вес жидкости.

Удельный вес и плотность связаны между собой зависимостью $\gamma=\rho\cdot g$, где g – ускорение свободного падения.

Тогда уравнение связи коэффициентов будет иметь вид:

$$\frac{k}{\mu}=\frac{K_ф}{\rho\cdot g}, \qquad (12)$$

Отсюда коэффициент фильтрации жидкости предложенным материалом с учетом проницаемости и свойств жидкости будет иметь вид:

$$K_ф=\frac{k\cdot\rho\cdot g}{\mu}, \qquad (13)$$

Разброс данных коэффициента в заявленном образце и рассчитанное значение для данной модели может составлять от 1- 3 %.

Определение граничных условий для расчета

Для определения устойчивости данной системы достаточно и необходимо определить предельные значения технологических параметров очищаемой среды, работы промышленного фильтра (аппарата), сорбционные характеристики фильтрующего материала.

К этим параметрам относятся коэффициенты уравнения:

k– коэффициент проницаемости, $м^2$;

L– длина пути фильтрации или высота слоя сорбента, м,

μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, Па·с;

ρ – плотность жидкости, $кг/м^3$;

g – ускорение свободного падения, 9,81 $м/с^2$.

C_0 – исходная концентрация извлекаемых ионов, $г/см^3$.

$F_ф$ – площадь фильтрования, $м^2$.

Q – объемный расход жидкости в единицу времени, $м^3/с$;

P – изменение давления на входе и выходе из колонки, Па.

d– диаметр фильтра, м;

Таблица 1.*Расчетные параметры для модели*

Параметры	Диапазоны	Параметры	Диапазоны
L, м	0,1 – 3	d,м	0,1 – 2,5
μ, Па·с	$1004\cdot10^{-6}$ – $469{,}9\cdot10^{-6}$	Q, $м^3/с$	0,003 – 0,02
ρ, $кг/м^3$	998.23 – 1028	$м^3$/час	10,8 - 65
$г/см^3$	0,998 – 1,028	P, Па	$1\cdot10^5$ – $2\cdot10^6$
		кгс/см ^{2}	19,8

Значение коэффициента проницаемости, $м^2$ для максимальных значений диапазонов технологических параметров, представлены на рисунке 5.

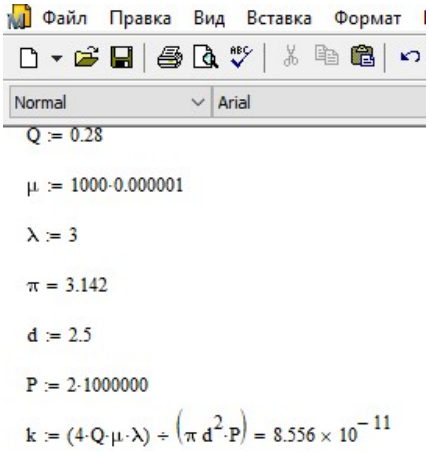


Рис. 5.Окно Mathcad расчета коэффициента проницаемости для максимальных значений технологических параметров.

Значение коэффициента проницаемости, $м^2$ для минимальных значений диапазонов технологических параметров, представлены на рисунке 6.

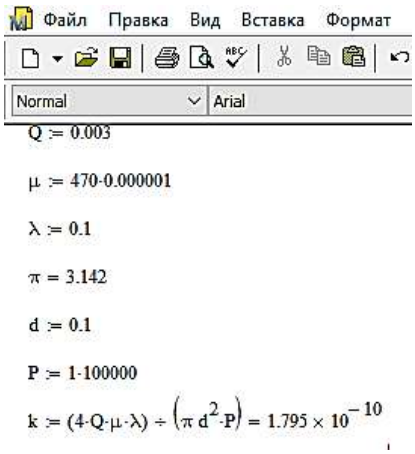


Рис.6. Окно Mathcad расчета коэффициента проницаемости для минимальных значений технологических параметров.

***Таблица 2**.Значения коэффициента проницаемости и режимы работы*

Фильтрующий материал	Коэффициент проницаемости, $м^2$	Режимы работы для материалов	D, мкм
этанол лигнин	$8\cdot10^{-15}$–$2{,}6\cdot10^{-14}$	*	0,002 –0,0036 мкм
шелуха подсолнуха	$1{,}25\cdot10^{-8}$	А	0,1–15 мкм
ЖСТ-1 (карбонизированный жом сахарного тростника)	$2\cdot10^{-9}$	А	более 1мкм
ШЕЛУХА ГРЕЧИХИ	$4\cdot10^{-9}$–$2{,}45\cdot10^{-6}$	А	2 – 35 мкм
скорлупы грецкого ореха	$4{,}8\cdot10^{-11}$	С	0,22 мкм
АУ	$2\cdot10^{-11}$–$2\cdot10^{-9}$	А	0,1 до 1,0 мкм
композитное волокно: ГЛ/ПАН 80:20	$1{,}8\cdot10^{-8}$–$0{,}65\cdot10^{-6}$	А	3–18 мкм

А – работа при максимальных параметрах фильтрации, Б – работа при средних параметрах фильтрации, С – работа при минимальных параметрах фильтрации, * – работа не возможна при минимальных параметрах фильтрации.

Предельные значения коэффициента проницаемости в диапазоне давлений от максимальных до минимальных значений соотносятся: k при P_{min} не менее $1\cdot10^{-9}$ $м^2$, k при P_{max} не менее $5.348\cdot10^{-11}$ $м^2$.

***Таблица 3**.Результаты изменения коэффициент проницаемости от параметров давления*

Фильтрующий материал	Режимы работы для материалов при P_{min}	Режимы работы для материалов при P_{max}
этанол лигнин	*	*
шелуха подсолнуха	А	А
ЖСТ-1 (карбонизированный жом сахарного тростника)	А	Б
Шелуха гречихи	А	Б
скорлупы грецкого ореха	С	С
АУ	А	А
композитное волокно: ГЛ/ПАН 80:20	А	А

Таким образом без натурных испытаний видно, что материал этанол лигнин не подходит для процесса промышленной сорбции, на сорбенты ЖСТ-1 и шелуха гречихи существенное влияние оказывает давление в системе.

Такие же результаты были получены при изменении расхода очищаемой жидкости.

Выводы

Предварительный расчет процесса фильтрации с использованием сорбентов при помощи математического описания позволяет без проведения натурных испытаний на объекте делать выводы о изменения характеристик материала, их зависимость от параметров среды, позволяет учесть формальную кинетику фильтрации, произвести начальное и оперативное тестирование сорбентов.

Так же необходимо в дальнейшем учесть сорбционные характеристики сорбента такие как обменная емкость и температуру и pH среды.

Списоклитературы

1. Основы теории фильтрации: учебное пособие. 2-е изд. / Н. Е. Леонтьев. – Москва: МАКС Пресс, 2017. 88 с.
2. Иванников А.В., Фёдоров В.В. Лабораторный практикум по подземной гидромеханике. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2004. – 27 с.
3. Основы теории фильтрации : учебное пособие / Н. Е. Леонтьев ; Моск. гос. ун-т им. М. В. Ломоносова, мех.-мат. фак. – Изд. 2-е, испр. – Москва : МАКС Пресс, 2017. – 86 с.
4. Сорбционные технологии.определение свойств сорбентов: учебно-методическое пособие для выполнения курсовой работы / Комиссаренков А. А., Федорова О. , СПбГТУРП. – СПб., 2015. – 44 с.
5. Изучение процесса адсорбции на стационарном слое адсорбента: Метод.указ. / Сост. В.В. Филиппов. – Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 27 с.: ил. 10.
6. Натареев, С.В. Разработка конструкции аппарата с неподвижным кольцевым слоем ионита / С.В.

Натареев, А.А. Быков, Д.Е. Захаров // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2018. – № 2 (54). – С. 84 – 91.
7. Рудобашта, С.П. Математическое моделирование экстрагирования целевого компонента из тел цилиндрической формы в полунепрерывном процессе / С.П. Рудобашта, М.К. Кошелева, Э.М. Карташов // Инженерно физический журнал. – 2016. – Т. 89 – № 3. – С. 595 – 602.

References

1. Fundamentals of the theory of filtration: a training manual. 2nd ed. / N. E. Leontiev. - Moscow: MAKS Press, 2017.88 s
2. Ivannikov A.V., Fedorov V.V. Laboratory workshop on underground hydromechanics. - M .: Russian State University of Oil and Gas named I.M. Gubkina, 2004 .-- 27 p.
3. Fundamentals of the theory of filtration: a training manual / N. E. Leontyev; Mosk. state un-t them. M.V. Lomo-nosova, mech. Fak. - Ed. 2nd, rev. - Moscow: MAKS Press, 2017 .-- 86 p.Sorption technologies. determination of the properties of sorbents: a teaching aid for the implementation of term paper / Komissarenko A. A., Fedorova O., SPbGTURP. - SPb., 2015 .-- 44 p.
4. Fundamentals of the theory of filtration: a training manual. 2nd ed. / N. E. Leontiev. - Moscow: MAX Press, 2017 .-- 88 p.
5. Studying the adsorption process on a stationary adsorbent layer: Method. decree. / Comp. V.V. Filippov. - Samara, Samar. st. technic. Univer., 2014. – 27 p.
6. Natareev S.V. Development of the design of a device with a fixed annular layer of ion exchanger / S.V. Natareev A.A. Bykov, D.E. Zakharov // Modern high technology. Regional application. - 2018.- No. 2 (54). – P. 84 – 91.
7. Rudobashta, S.P. Mathematical modeling of extraction of the target component from cylindrical bodies in a semi-continuous process / S.P. Rudobashta, M.K. Kosheleva, E.M. Kartashov // Engineering Physics Journal. - 2016. - T. 89 - No. 3. - P. 595 - 602.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 504.062.2

Обращение с отходами производства и потребления на предприятии АО «КВКЗ «Бахчисарай»

Е.В. Заблоцкая[1], Г.В. Кучерик[2], И.В. Шевцова[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь,299053 Россия, [1]evere82@mail.ru, [2]galina_kucherik@mail.ru, [3]ilona033696@mail.ru

Статья поступила 11.02.2020 г.; после доработки 13.02.2020 г.

Аннотация

В статье представлены результаты анализа деятельности в области обращения с отходами производства и потребления на предприятии АО «КВКЗ «Бахчисарай». Также дана характеристика области обращения с отходами производства и потребления в Российской Федерации в целом и в Республике Крым в частности. Полученные данные позволили оценить соответствие деятельности предприятия требованиям природоохранного законодательства.

Ключевые слова: отходы производства и потребления, накопление отходов, размещение отходов, места накопления отходов, твёрдые коммунальные отходы.

Waste management of production and consumption at the enterprise JSC "CRAC "Bakhchisaray»

E.V. Zablotskaya[1], G.V. Kucherik[2], I.V. Shevcova[3]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
[1]evere82@mail.ru, [2]galina_kucherik@mail.ru, [3]ilona033696@mail.ru

Received 11.02.2020 y.; received in final form 13.02.2020 y.

Abstract

The article presents the results of the analysis of activities in the field of waste management of production and consumption at the enterprise of JSC "kvkz "Bakhchisaray". It also describes the area of waste management in the Russian Federation as a whole and in the Republic of Crimea in particular. The obtained data allowed us to assess the compliance of the company's activities with the requirements of environmental legislation.

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

Введение

Проблема обращения с отходами производства и потребления превратилась в последние десятилетия в одну из наиболее острых экологических проблем России. Урегулирование проблемы загрязнения окружающей среды отходами производства и потребления представляет собой комплекс серьезных задач, требующих системного и безотлагательного решения. В данном направлении поручениями Президента Российской Федерации В. В. Путина была подчеркнута необходимость обеспечения безопасности при обращении с отходами I и II классов опасности, а также создания отрасли обращения с твёрдыми коммунальными отходами замкнутого

цикла (раздельный сбор, транспортирование, обработка, утилизация и размещение) с целью снижения объёмов захоронения и увеличения объемов утилизации твердых коммунальных отходов для достижения уровня лучших мировых стандартов.

Общая величина накопленных и учтенных отходов производства и потребления в целом по стране составляла на конец 2015 г. примерно 31,5 млрд. т, а на конец 2016 г. – порядка 40,7 млрд. т. Целесообразно иметь в виду, что приведенные цифры носят оценочный характер из-за объективных сложностей в переучете отходов, образовавшихся многие десятилетия назад, а также их доучёте на вновь выявляемых неорганизованных («стихийных») свалках. Кроме того, имеются весьма серьезные проблемы в объективном отражении последствий разложения, разубоживания, выветривания, вымывания, запыления, зарастания растительностью и т.п. ранее накопленных отходов.

Соответствующие данные, как и последующие индикаторы, характеризующие основные стадии обращения с отходами, взяты из сводных отчетов предприятий-природопользователей по форме федерального статистического наблюдения № 2-ТП (отходы) «Сведения об образовании, использовании, обезвреживании, транспортировании и размещении отходов производства и потребления» (в 2015 г. по ней отчиталось 168,4 тыс. природопользователей, а в 2016 г. – 198,4 тыс. природопользователей). Сбор и обработка статистических данных по этой форме осуществляются в системе Росприроднадзора.

Подавляющая часть накопленных и идентифицированных отходов по приблизительной оценке в 2015 г. относилась к V классу опасности, то есть к неопасным отходам, 31,1 млрд. т, или почти 99% к их общему объему; в 2016 г. – 40,3 млрд. т, или тоже 99% к итогу. Оставшаяся часть приходилась на опасные отходы: в том числе отнесенные к I классу опасности в 2015 г. – 14 тыс. т и в 2016 г. – 26 тыс. т; к II классу – 375 и 392 тыс. т соответственно; к III классу – более 26 млн. т и около 177 млн. т; IV классу опасности – около 328 и свыше 314 млн. т [1].

В 2018 г. на территории Российской Федерации образовалось 7 266 млн. т отходов, что на 16,8 % выше уровня 2017 г. Удельный показатель общего объема образования отходов на единицу ВВП в 2018 г. составил 81,3 т на 1 млн. руб.

За период 2010-2018 гг. количество ежегодно образующихся отходов увеличилось с 3 735 млн. т до 7 266,1 млн. т, или на 94,5 %. В начале рассматриваемого периода (до 2012 г.) отмечен рост значений данного показателя примерно на 15-16 % в год; далее до 2015 г. наблюдалась относительная стабильность, с незначительными изменениями в пределах 2-4 %; в последние два года (2017-2018 гг.) произошло повышение значений на 14 % и 17 % соответственно. Изменение удельного показателя общего объема образования отходов на единицу ВВП характеризовалось аналогичными тенденциями. Общий прирост удельного показателя за период 2011-2015 гг. составил 9,6 т на 1 млн. руб., или 13,4 %; за период 2016-2018 гг. – 18 т на 1 млн. руб., или 28,4 %.

Основной вклад в общее количество отходов вносят отходы V и IV классов опасности (практически неопасные и малоопасные): в 2018 г. количество таких отходов составило 7 138,1 млн. т (или 98,238 % от общего объема образования отходов) и 107,3 млн. т (или 1,477 % от общего объема образования отходов) соответственно. Количество отходов III класса опасности составило 20,4 млн. т (или 0,281 % от общего объема образования отходов), II класса опасности – 0,27 млн. т (0,004 % от общего объема образования отходов), I класса опасности – 0,02 млн. т (или 0,0003 % от общего объема образования отходов).

За период 2010-2018 гг. соотношение объемов отходов по классам опасности оставалось практически неизменным. Наблюдалось увеличение количества образованных отходов: V класса опасности – с 3 620,4 млн. т до 7 138,1 млн. т, или на 97,2 %, IV класса опасности с 96,8 млн. т до 107,3 млн. т, или на 10,8 %, и III класса опасности – с 16,7 млн. т до 20,4 млн. т, или на 25,9 %. Снижение количества отмечено по отходам II класса опасности – с 0,71 млн. т до 0,27 млн. т, или на 62 %; по отходам I класса опасности – с 0,17 млн. т до 0,02 млн. т, или на 88 % (таблица 1).

В разрезе видов экономической деятельности наибольший объем образования отходов производства и потребления в 2018 г. приходился на вид экономической деятельности «добыча полезных ископаемых» – 6 850,5 млн. т, или 94,2 % от общего количества образованных отходов. Это связано с тем, что при добыче и обогащении полезных ископаемых образуется наибольшее количество отходов, в основном вскрышных пород. Доля отходов по виду экономической деятельности «обрабатывающие производства» в общем объеме образования отходов составила 243,8 млн. т отходов, или 3,4 % от общего количества отходов. На долю вида эконо-

мической деятельности «сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» в 2018 г. приходилось 42,8 млн. т отходов, или 0,6 % от общего количества образованных отходов. По видам экономической деятельности «обеспечение электрической энергией, газом и паром, кондиционировании воздуха» и «водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений» в 2018 г. образовалось 30,7 млн. т отходов, или 0,4 % от общего количества отходов производства и потребления.

Таблица 1. *Динамика образования отходов производства и потребления в Российской Федерации по классам опасности, 2010-2018 гг., млн. т*

Класс опасности	Годы								
	2010	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**
Всего	3734,7	4303,4	5007,91	5152,8	5168,3	5060,2	5441,3	6220,7	7266,1
В том числе: I класс опасности	0,17	0,14	0,05	0,06	0,06	0,08	0,03	0,02	0,02
II класс опасности	0,71	0,66	0,46	0,36	0,30	0,27	0,30	0,22	0,27
III класс опасности	16,7	15,8	11,6	19,1	19,7	21,6	19,3	17,1	20,4
IV класс опасности	96,8	103,6	101,5	97,1	104,3	88,2	78,6	90,4	107,3
V класс опасности	3620,4	4183,2	4894,3	5036,2	5044,0	4950,2	5343,1	6112,9	7138,1

За период 2010-2018 гг. соотношение объемов образования отходов производства и потребления по различным видам экономической деятельности изменилось незначительно.

Доля отходов от добычи полезных ископаемых увеличилась с 89,2 % (3 334,6 млн. т) до 94,2 % (6 850,5 млн. т); доля отходов обрабатывающих производств сократилась с 7,5 % (280,1 млн. т) до 4,7 % (243,1 млн. т) в начале периода 2010-2014 гг., далее наблюдался рост данного показателя до 10 % (549,3 млн. т) в 2016 г.

По сравнению с данными 2010 г. в 2017 г. доля отходов обрабатывающих производств существенно снизилась – на 4,4 % (274,8 млн. т), а в 2018 г. на 3,4 % (243,8 млн. т) (таблица 2).

Таблица 2. *Динамика образования отходов производства и потребления в Российской Федерации по видам экономической деятельности, 2010-2018 гг., млн. т*

Виды деятельности	Годы								
	2010	**2011**	**2012**	**2013**	**2014**	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**
Всего	3734,7	4303,3	5007,9	5152,8	5168,3	5060,2	5441,3	6220,6	7266,1
в том числе: сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство	24,1*	27,5*	26,1*	40,3*	43,1*	45,8*	49,2	41,5	42,8
добыча полезных ископаемых	3334,6	3818,7	4629,3	4701,2	4807,3	4653,0	4723,8	5786,2	6850,5
обрабатывающие производства	280,1	280,2	291,0	253,7	243,1	282,9	549,3	274,8	243,8
обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха; водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений**	68,0	58	28,4	24,1	28,3	26,4	27,7	30,5	30,7
строительство	11,1	14,1	14,6	16,7	17,6	17,1	21,1	-	36, 0
транспортировка и хранение***	4,9	3,7	3,1	4,5	3,9	2,9	3,0	-	2,9
предоставление прочих видов услуг******	2,3	69,6	3,2	6,0	7,6	5,0	0,6	0,2	0,1

Примечание: *за исключением рыболовства и рыбоводства;

**названия даны в соответствии с действующим в настоящее время Общероссийским классификатором видов эко-

номической деятельности (ОКВЭД). До 2016 г. данный вид экономической деятельности имел название «производство и распределение электроэнергии, газа и воды». Данные за 2016, 2017, 2018 гг. не вполне сопоставимы со сведениями за предыдущий период;
***до 2016 г. – транспорт и связь;
****до 2016 г. – предоставление прочих коммунальных, социальных и персональных услуг.

Анализ динамики показателей объема образования отходов по видам экономической деятельности затруднен в связи с изменениями набора и наполнения перечня и наименований видов экономической деятельности в рассматриваемый период.

В частности, вид экономической деятельности «сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство» до 2016 г. не включал в себя сведения о рыболовстве и рыбоводстве; учет по виду экономической деятельности «обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха» до 2016 г. не включал данные по организации сбора и утилизации отходов и по некоторым другим видам деятельности.

Серьезную проблему представляет накопление значительных объемов отходов, которое характерно для большинства всех видов экономической деятельности.

Общая величина накопленных отходов производства и потребления составила на конец 2017 г. 38,1 млрд. т, а на конец 2018 г. – 42,4 млрд. т (рост на 11 %).

Наибольшая часть (99,2 %) накопленных отходов относится к V классу опасности, то есть к практически неопасным отходам.

Чрезвычайно опасных отходов (I класс опасности) к концу 2018 г. накоплено 0,003 млн. т, высокоопасных (II класс опасности) – 0,364 млн. т, умеренно опасных отходов (III класс опасности) – 15,209 млн. т, малоопасных (IV класс опасности) – 291,266 млн. т [2].

Описание исследования

Что касается Республики Крым, то проблема накопления отходов, в том числе отходов производства и потребления, является одной из основных угроз экологической безопасности.

По официальным статистическим данным в Республике Крым по состоянию на 1 января 2014 года накоплено 55,1 млн. тонн отходов различного класса опасности. К накоплению отходов привело отсутствие технологий по их переработке и отсутствие средств на внедрение существующих технологий.

По результатам систематизированных данных, представленных субъектами хозяйствования за 2018 год, в Республике Крым образовалось – 8051370,207 т отходов производства и потребления, в том числе:

- I класса опасности – 31,723 т;
- II класса опасности – 125,018 т;
- III класса опасности – 52352,583 т;
- IV класса опасности – 502285,684 т;
- V класса опасности – 7496575,199 т.

Основная доля образующихся в республике отходов приходится на отходы IV – V классов опасности и составляет 99,34% от общего количества образующихся отходов производства и потребления.

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

- строительства – 87,57% от общего объема образования;
- обрабатывающего производства – 4,05% от общего объема образования;
- добычи полезных ископаемых – 2,72% от общего объема образования [3].

Акционерное общество «Крымский винно-коньячный завод» «Бахчисарай» относится к обрабатывающей отрасли [4].

Это современное европейское предприятие полного цикла, где производится алкогольная продукция на любой вкус: различные вина, вермуты, сидры, коньяки, настойки, бальзамы и водка. Все они отвечают высоким стандартам качества, имеют сертификаты соответствия и проходят несколько уровней внутреннего контроля.

Общая площадь территории АО «КВКЗ «Бахчисарай» составляет 13,35 га. В том числе: застроенные площадки – 34262,00 м², площадь твердого покрытия – 75282,00 м², площадь зеленых насаждений – 1020,00 м², площадь убираемой территории – 4245,00 м².

Производственная мощность завода первичного виноделия составляет 5 тыс. тонн переработки винограда за сезон, 980 тыс. дал. единовременного хранения виноматериала; завод вторичного виноделия – 6 линий розлива, средней производительностью по 6,0 тыс. бут. в час; склад готовой продукции – общая площадь 1982,8 м²; спиртохранилище – 127 тыс. дал. единовременного хранения спирта этилового, 57 тыс. дал. единовременного хранения спирта коньячного.

Для производства вин и коньяков используется виноград традиционных сортов. На заводе

также производится водка из отборных зерновых спиртов от лучших производителей и чистой артезианской воды.

Предприятие состоит из четырех основных цехов:

- цех приготовления виноматериалов, мощность которого составляет десять тысяч тонн винограда в сезон;
- цех розлива тихих вин и крепких напитков, оборудованный автоматической линией розлива итальянской компании Vir Mauri производительностью шесть тысяч бутылок в час;
- водочный цех, где производится водка из отборных зерновых спиртов от лучших производителей и чистой артезианской воды;
- коньячный цех, где проводится работа по подбору выдержанных коньячных спиртов.

На всех этапах производства осуществляется физико-химический и микробиологический контроль виноматериалов и готовой продукции, контроль качества сырья и материалов, выпускаемой продукции, соблюдение температурных и других режимов, технологических инструкций и нормативных документов. Предприятие обеспечено специалистами высокой квалификации [5].

Предприятие включает в себя ряд структурных подразделений:

1. Административное подразделение;
2. Производственный участок;
3. Склады;
4. Гараж для стоянки автотранспорта.

Режим работы предприятия – 247 дней в году, 5 дней в неделю, 8 часов в день. Количество сотрудников АО «КВКЗ «Бахчисарай» – 250 человек.

Территория и помещения площадки освещаются люминесцентными лампами и лампами накаливания. В офисных помещениях установлена компьютерная техника.

Офисная техника включает в себя: системные блоки, мониторы, копировально-множительные устройства (МФУ), устройства ввода информации (клавиатура, «мышь»), картриджи печатающий устройств и МФУ.

Часть территории отведена под зеленые насаждения, при уходе за которыми образуются растительные отходы.

Периодически осуществляется текущий ремонт зданий и оборудования предприятия, обслуживание оборудования, включающее замену запчастей.

В таблице 3 представлены основные виды отходов характерные для каждого структурного подразделения.

Всего в процессе производственной деятельности предприятия образуется 58 наименований отходов производства и потребления, в том числе:

I класса опасности – 2 наименования;
II класса опасности – 1 наименование;
III класса опасности – 6 наименований;
IV класса опасности – 27 наименований;
V класса опасности – 22 наименования.

Таблица 3. *Источники образования отходов производства и потребления на предприятии АО «КВКЗ «Бахчисарай»*

Структурное подразделение	Виды отходов
Административная деятельность	- мусор от офисных и бытовых помещений организаций не сортированный (исключая крупногабаритный); - мусор и смет производственных помещений малоопасный; - лампы накаливания, утратившие потребительские свойства; - лампы ртутные, ртутно-кварцевые, люминесцентные, утратившие потребительские свойства; - отходы бумаги и картона от канцелярской деятельности и делопроизводства.
Производство дистиллированных алкогольных напитков	- гребни виноградные; - дрожжевые осадки жидкие; - дрожжевые осадки отжатые; - выжимки сладкие; - послеспиртовая барда; - картон фильтровальный, отработанный при фильтрации виноматериалов.
Склады	- отходы упаковочной бумаги незагрязненные; - отходы пленки полиэтиленовой и изделий из нее незагрязненные; - лом изделий из стекла.

Гараж	- аккумуляторы свинцовые отработанные неповрежденные, с электролитом; - отходы минеральных масел моторных, камеры пневматических шин; - фильтры очистки масла автотранспортных средств отработанные; - свечи зажигания автомобильные отработанные.

Как видно в основном это отходы IV и V классов опасности. Что же касается количества образованных отходов, то оно составляет 189,596 тонн в год. 70% от всей массы образованных отходов приходится на отходы IV-го класса опасности. Около 29-ти % образуется отходов V-го класса опасности. И примерно 1% приходится на отходы I, II и III классов опасности (рис. 1).

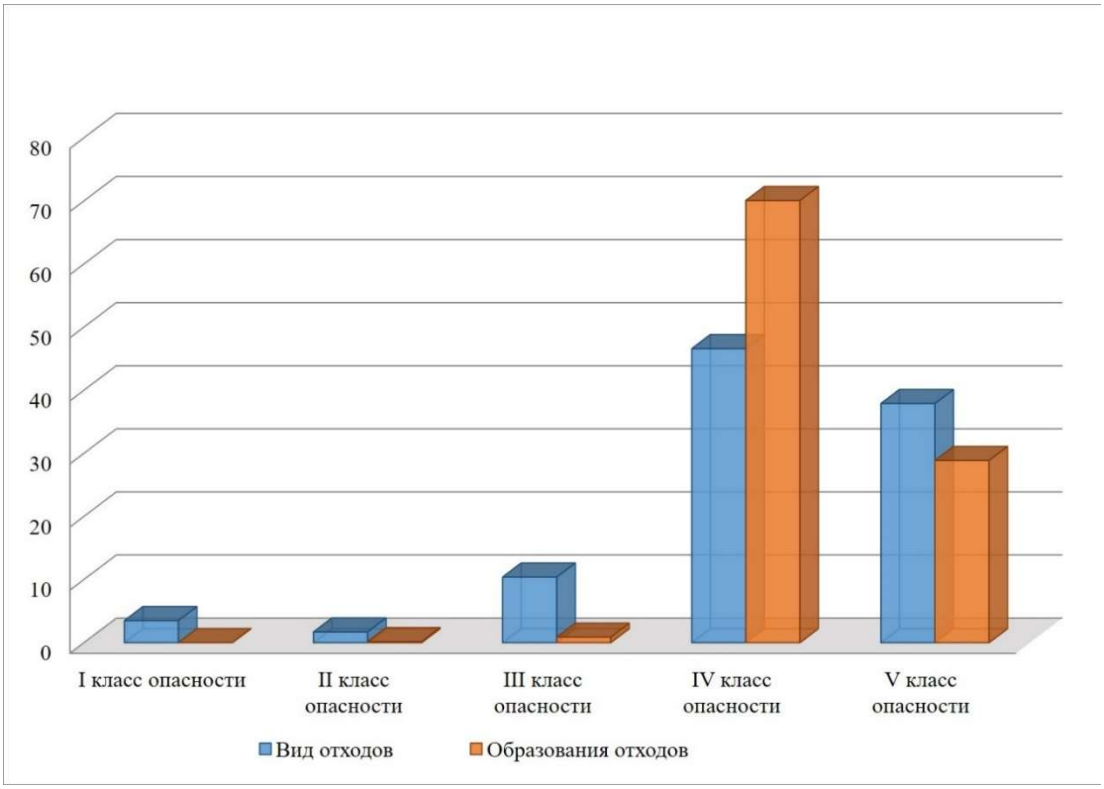


Рис. 1. Процентное содержание видов отходов и образование отходов производства и потребления на предприятии АО «КВКЗ «Бахчисарай» в т/год.

Для образованных на предприятии отходов оборудованы места временного накопления отходов. Данные места накопления отходов были оборудованы в соответствии с требованиями СанПиН 2.1.7.1322-03 «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления», Федерального закона от 18.12.2006 № 232-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» и Правил противопожарного режима в Российской Федерации, утверждёнными постановлением Правительства РФ от 25.04.2012 № 390. Перечень и вместимость мест (площадок, контейнеров, бункеров и других объектов) накопления отходов, предназначенных для формирования партии отходов с целью их дальнейшего использования, обезвреживания, размещения, передачи другим хозяйствующим субъектам представлены в таблице 4.

Твёрдые коммунальные отходы предприятие передаёт для размещения на полигон ТКО с. Тургенево Белогорского района – один из трёх полигонов ТКО на территории Республики Крым, которые включены в Государственный реестр объектов размещения отходов. Всего на территории республики функционирует 16 полигонов ТКО. Территориальной схемой обращения с отходами, в том числе с твёрдыми коммунальными отходами, Республики Крым предлагается модернизация существующих объектов и дове-

дение их до требований природоохранного законодательства, в том числе постановка на учет в государственном реестре объектов размещения отходов. Согласно требованиям Федерального закона от 24 июля 1998 года № 89-ФЗ «Об отходах производства и потребления» захоронение отходов, которые подлежат повторному использованию, не допускается. Во исполнение норм законодательства все твёрдые коммунальные отходы, образующиеся на территории Республики Крым, будут проходить предварительную обработку на мусоросортировочных комплексах, строительство которых предусматривается на единой или отдельной площадке с полигоном ТКО.

Таблица 4. *Перечень и вместимость мест накопления отходов производства и потребления на предприятии АО «КВКЗ «Бахчисарай»*

№ п/п	Наименование и номер по карте-схеме	Вместимость, тонн					
		Для накопления отходов					
		Общая	Для накопления отходов				
			I класс опасности	II класс опасности	III класс опасности	IV класс опасности	V класс опасности
1	МВНО №1	0,682075	0,007575	-	-	0,6745	-
2	МВНО №2	2,2	-	-	-	1,00	1,2
3	МВНО №3	1,26	-	0,01	1,2	0,050	-
4	МВНО №4	0,05	-	-	-	-	0,050
5	МВНО №5	7,5	-	-	-	2,5	5,0
6	МВНО №6	3,5	-	-	-	-	3,5

С целью обеспечения экологически безопасного функционирования объектов коммунальной инфраструктуры, связанных с обращением с ТКО, в рамках федерально-целевой программы «Социально-экономическое развитие Республики Крым и города Севастополя до 2020 года» предусмотрены мероприятия по рекультивации5 полигонов ТКО в г. Симферополь, Керчь, Алушта, Саки, Старый Крым. Администрациями соответствующих муниципальных образований в течение 2016-2017 годов были приняты акты о закрытии указанных полигонов для приема и размещения ТКО.

На территории республики действует Государственная программа Республики Крым в области обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, на 2017 – 2021 годы.

Целью Госпрограммы является улучшение экологической и санитарно-эпидемиологической ситуации в Республике Крым путем создания эффективной современной инфраструктуры по обращению с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами и развитие системы раздельного накопления ТКО.

Государственной программой Республики Крым в области обращения с отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами, на 2017-2021 годы предусмотрено за счет средств частных инвесторов:

- реализация 39 инвестиционных проектов по созданию объектов обращения отходами, в том числе с твердыми коммунальными отходами;
- строительство 7 объектов для обработки твердых коммунальных отходов (автоматизированных мусоросортировочных комплексов);
- строительство 5 объектов для размещения неутилизируемой части твердых коммунальных отходов (полигонов захоронения твердых коммунальных отходов);
- строительство 9 объектов накопления твердых коммунальных отходов (мусороперегрузочных станций) с целью их транспортирования на автоматизированные мусоросортировочные комплексы;
- строительство 17 объектов утилизации твердых коммунальных отходов;
- строительство 1 комплекса по термическому обезвреживанию биологических отходов животного происхождения.

Меры государственного и правового регулирования реализации данной программы предусматривают:

- подготовку и выпуск нормативных документов в области обращения с твёрдыми коммунальными отходами, в том числе определяющих порядок сбора, транспортирования, обработки, обезвреживания и захоронения;
- разработку и утверждение муниципальных

схем размещения мест сбора ТКО и крупногабаритных отходов;

- разработку конкурсной документации и проведение конкурсов на право заключения концессионных соглашений на создание объектов обращения с твёрдыми коммунальными отходами;
- предоставление налоговых льгот инвестору как участнику свободной экономической зоны и возмещение части процентной ставки кредитов как участнику малого и среднего предпринимательства;
- создание автоматизированной информационно-аналитической базы данных о состоянии обращения с отходами;
- разработку и утверждение единых тарифов по обращению с твёрдыми коммунальными отходами (по кластерам);
- нормирование природопользования;
- ограничение (приостановку) деятельности источников загрязнения окружающей среды в случае превышения предельно допустимых концентраций загрязняющих веществ;
- государственное финансирование мероприятий, направленных на снижение негативного влияния отходов на окружающую среду, сохранение неизмененных (слабо измененных) природных комплексов и биоразнообразия, создание эффективной системы мониторинга окружающей среды и экологического образования и просвещения;
- привлечение инвестиций в сферу переработки и утилизации отходов.

Заключение

Приоритетные направления государственной политики в области обращения с отходами выражены в максимальном использовании исходного сырья и материалов, предотвращении образования отходов, сокращении образования отходов и снижение класса опасности отходов в источниках их образования, утилизации и обезвреживании отходов.

Список литературы

1. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа. – 2017. – 760 с.
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». – М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. 844 с.
3. Доклад о состоянии и охране окружающей среды на территории Республики Крым в 2018 году, 2019 – 422 с.
4. "ОК 029-2014 (КДЕС Ред. 2). Общероссийский классификатор видов экономической деятельности": утв. Приказом Росстандарта от 31.01.2014 N 14-ст.
5. Годовой отчет Акционерного общества «Крымский винно-коньячный завод «Бахчисарай» по результатам 2015 года, протокол № 1 от 17 июня 2016 г.

References

1. State report "on the state and environmental protection of the Russian Federation in 2016". - Moscow: Ministry of natural resources of Russia; NIA-Nature. - 2017. – 760 p.
2. State report "on the state and environmental protection of the Russian Federation in 2018". - Moscow: Ministry of natural resources of Russia; nce "Cadastre", 2019. 844 PP.
3. Report on the state and protection of the environment on the territory of the Republic of Crimea in 2018, 2019-422 p.
4. "OK 029-2014 (kdes ed. 2). All-Russian classifier of types of economic activity": UTV. By the order of Rosstandart on 31.01.2014 N 14, art.
5. Annual report of the joint-Stock company "Crimean wine and cognac factory "Bakhchisaray" on the results of 2015, Protocol No. 1 of June 17, 2016.

УДК 504.06

Пути снижения негативного воздействия транспортных систем РФ на окружающую среду

Е.В. Заблоцкая
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, evere82@mail.ru

Статья поступила 19.02.2020 г.; после доработки 21.02.2020 г.

Аннотация

В статье представлены результаты анализа возможных путей снижения негативного воздействия транспортных систем РФ на окружающую среду. Рассмотрен существующий на сегодняшний день опыт внедрения устойчивых городских транспортных систем в Российской Федерации. Выполнен анализ нормативно-правовой базы регламентирующей меры направленные на снижение воздействия автотранспорта на атмосферный воздух. Определены основные методы стимулирования применения более экологичных модификаций автотранспортных средств.

Ключевые слова: автотранспорт, загрязнение атмосферного воздуха, газомоторное топливо, электромобили, городские транспортные системы.

Ways to reduce the negative impact of transport systems in the Russian Federation on the environment

E.V. Zablotskaya
Sevastopol state university, 33 Universitetskayast., Sevastopol, 299053, Russia, evere82@mail.ru

Received 19.02.2020 y.; received in final form 21.02.2020 y.

Abstract

The article presents the results of the analysis of possible ways to reduce the negative impact of transport systems in the Russian Federation on the environment. The current experience of implementing sustainable urban transport systems in the Russian Federation is considered. The analysis of the legal framework regulating measures aimed at reducing the impact of vehicles on the atmospheric air is performed. The main methods of stimulating the use of more environmentally friendly modifications of vehicles are defined.

Keywords: motor transport, air pollution, gas fuel, electric vehicles, urban transport systems.

Введение

Автотранспорт является одним из основных источников загрязнения атмосферного воздуха в крупных городах страны. В соответствии с распоряжением Росприроднадзора от 01.11.2013 № 6-р, в Российской Федерации с 2013 года ежегодно проводятся работы по оценке выбросов от отдельных видов передвижных источников в составе автомобильного и железнодорожного транспорта [1].

Результаты выбросов наиболее распространенных загрязняющих атмосферу веществ от автомобильного транспорта в краткосрочной динамике приведены в таблице 1.

Начиная с 2013 года объем выбросов от автотранспорта сохранял тенденцию к увеличению и в 2018 году составил 15,1 млн. тонн (таблица 1).

В определенной степени это объясняется возрастом транспортных средств, находящихся в эксплуатации (таблица 2).

Таблица 1. *Динамика выбросов наиболее распространенных загрязняющих атмосферу веществ от автомобильного транспорта, 2012-2018 гг., тыс. т*

Год	Всего	из них				
		CO	ЛОС	NO_x[1)]	сажа	SO_2
2012	12679	10091	914	1419	24	75
2013	13424	10407	1368	1459	25	76
2014	13622	10555	1390	1483	25	77
2015	13819	10707	1411	1504	26	78
2016	14105	10929	1440	1535	26	80
2017	14448	11195	1478	1570	27	81
2018	15108	11701	1544	1648	28	85

Примечание: [1)] в пересчете на NO_2.

Таблица 2. *Возрастная структура транспортных средств в Российской Федерации в 2018 г., %*

Возрастная категория транспортных средств	Доля в общем количестве транспортных средств	В том числе в собственности	
		физических лиц	юридических лиц
с года выпуска которых прошло до 1 года включительно	8,6	8,3	12,1
с года выпуска которых прошло от 1 до 3 лет включительно	8,9	8,5	11,9
с года выпуска которых прошло от 3 до 5 лет включительно	9,7	9,6	10,7
с года выпуска которых прошло от 5 до 10 лет включительно	21,7	21,9	19,3
с года выпуска которых прошло от 10 до 15 лет включительно	16,5	17,0	12,0
с года выпуска которых прошло свыше 15 лет включительно	34,6	34,7	34,0
Все возрастные категории транспортных средств	100	100	100

Доля транспортных средств возраста до 5 лет составляет четвертую часть (27,2 %) от общего количества; транспортные средства старше 5 лет составляют 72,8 % от общего количества. Лидирующее положение в данной категории занимает транспорт возрастом свыше 15 лет (34,6 % от общего количества), немного уступает ему транспорт возрастом от 5 до 10 лет (21,7 %) [2].

Характерно, что доля твердых веществ (то есть прежде всего, сажи, С) в выбросах автотранспортных средств составляла в 2018 году всего лишь 0,185% (2017 году – 0,186%; в 2016 году – 0,184%).

Однако по оценкам Всемирной организации здравоохранения дисперсные частицы «черного» углерода (сажи), особенно частицы размером менее 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) очень опасны для здоровья населения. Частицы менее 2,5 мкм способны проникать в альвеолы лёгких (если не считать наночастицы – размером менее 0,1 мкм, которые могут проникать даже непосредственно в клетки).

Частицы размером менее 10 мкм (PM_{10}) проникают в трахеи, бронхи, бронхиолы. Сумму дисперсных частиц ингалябильных размеров, способных проникать в дыхательные пути человека при массовом дыхании принято обозначать TSP. В таблице 3 представлены данные по вкладу автотранспорта в выбросы дисперсных частиц различных размеров (TSP, PM_{10}, $PM_{2,5}$).

Таблица 3. *Доля различных источников в выбросах дисперсных частиц автотранспортом*

Источник	TSP	PM_{10}	$PM_{2,5}$
Износ шин и тормозов	33	65	23
Износ дорожного покрытия	28	35	12
Отработавшие газы АТС	39	–	65

Из таблицы 3 следует, что выбросы дисперсных частиц размером 10 мкм (PM_{10}) практически полностью связаны с истиранием дорожных покрытий (35%) и рабочих элементов автотранспортных средств (65%).

В то же время образование мелкодисперсных частиц размером менее 2,5 мкм ($PM_{2,5}$) на 65% обусловлено выбросами отработавших газов автомобилей.

Учитывая, что использование газомоторного топлива позволяет добиться практически полного отсутствия в отработавших газах автомобилей содержания частиц размером менее 2,5 мм, использование автотранспортных средств на данном топливе является важнейшим направлением уменьшения негативного воздействия на воздушный бассейн от передвижных источников [3].

Постановка задачи

Цель исследования заключалась в анализе возможных путей снижения негативных воздействий транспортных систем РФ на окружающую среду.

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

- рассмотреть существующий на сегодняшний день опыт внедрения устойчивых городских транспортных систем в Российской Федерации;
- провести анализ нормативно-правовой базы регламентирующей меры направленные на снижение воздействия автотранспорта на атмосферный воздух;
- проанализировать возможность стимулирования применения более экологичных модификаций автотранспортных средств.

Описание исследования

Известно, что значимую роль в формировании выбросов загрязняющих веществ в атмосферу играют виды моторного топлива, которые используются транспортными средствами (таблица 4).

Данные таблицы 4 позволяют отметить, что только для 3 % всего транспорта предусмотрена возможность использования в качестве топлива природного газа, сжиженного углеводородного (нефтяного) газа, а также использование электродвигателей [2].

Таблица 4. *Структура транспортных средств в Российской Федерации по видам моторного топлива в 2018 г., %*

Транспортные средства по видам используемого моторного топлива	**Доля в общем количестве транспортных средств**	**В том числе в собственности**	
		физических лиц	**юридических лиц**
С возможностью использования природного газа, а также сжиженного углеводородного (нефтяного) газа	2,90	2,82	3,72
С возможностью использования электродвигателей	0,04	0,04	0,04
С возможностью использования только бензина и дизельного топлива	97,06	97,15	96,23
Все виды транспортных средств	100,00	100,00	100,00

Что касается увеличения количества транспортных средств, использующих в качестве топлива природный газ, то Министерством транспорта разработан и обсуждается проект Государственной программы Российской Федерации «Расширение использования природного газа в качестве моторного топлива на транспорте и техникой специального назначения» согласно которой задача внедрения газомоторной техники относится к числу приоритетных для транспортного комплекса Российской Федерации.

Использование газомоторного топлива позволяет:

- – уменьшить себестоимость перевозок на 15–25% за счет меньшей цены газомоторного топлива;
- – снизить выбросы токсичных веществ в окружающую среду (оксида углерода – в 1,5–2 раза, оксида азота – в 2 раза, углеводородов – в 1,5–3 раза, задымленности – в 9 раз);
- – повысить ресурс двигателей и срок эксплуатации транспортных средств и техники специального назначения в 1,3–1,5 раза.

Кроме того, к важным преимуществам природного газа относится возможность его использования при низких температурах, что позволяет

эксплуатировать газомоторные автотранспортные средства в условиях холодного климата северных регионов Российской Федерации.

Правительством Российской Федерации поставлена цель доведения к 2020 году в субъектах Российской Федерации уровня использования природного газа в качестве моторного топлива на общественном автомобильном транспорте и транспорте дорожно-коммунальных служб:

- в городах с численностью населения более 1 млн. человек – до 50% общего количества единиц техники;
- в городах с численностью населения более 300 тыс. человек – до 30% общего количества единиц техники;
- в городах и населенных пунктах с численностью населения более 100 тыс. человек – до 10% общего количества единиц техники.

Программа предусматривает закупку только техники, произведенной на территории Российской Федерации, что позволит поддержать российские машиностроительные предприятия и стимулировать спрос на отечественную технику.

К основным российским производителям газомоторной техники относятся ПАО "КАМАЗ", ООО УК "Группа ГАЗ", ООО "Волгобас", ООО "ИВЕКО-АМТ".

Что же касается автовладельцев, то опросы показали, что для стимулирования перехода на газомоторное топливо его розничная цена и в перспективе не должна превышать 50% от стоимости традиционных видов топлива.

Это связано с необходимостью обеспечения приемлемого срока окупаемости инвестиций в закупку газомоторных автотранспортных средств, продажная цена которых в среднем на 20% выше по сравнению с техникой, работающей на бензине или дизельном топливе.

Стабильный рост мирового рынка электромобилей и подключаемых гибридов, наблюдающийся в последние годы, а также постоянное совершенствование соответствующих технологий позволяют считать этот вид транспорта перспективным. Это касается, в том числе и России.

Классические автомобили с двигателями внутреннего сгорания на «холостом ходу» выбрасывают в 2–3 раза больше загрязняющих веществ, чем при установившемся режиме движения, гибридные автомобили при этом используют ресурс электродвигателя, что снижает выбросы, а электромобили – не производят выбросов на улично-дорожной сети (даже, несмотря на то, что они увеличивают выбросы предприятий по производству энергии, такие выбросы производятся на высотах от 100 м и обеспечивают значительно более низкие концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферного воздуха).

В утвержденном Владимиром Владимировичем Путиным Перечне поручений по итогам Госсовета по вопросу "Об экологическом развитии Российской Федерации в интересах будущих поколений", состоявшегося 27 декабря 2016 года, органам исполнительной власти субъектов Российской Федерации в срок до 1 июля 2017 года было рекомендовано реализовать меры по стимулированию использования экологически чистого транспорта в целях снижения выбросов загрязняющих веществ при эксплуатации транспортных средств в населенных пунктах с высоким уровнем загрязнения атмосферного воздуха, включая создание необходимой инфраструктуры, обеспечения приоритетного движения и парковки экологически чистого транспорта, внедрение систем управления пассажирским транспортом.

Постановлением Правительства России от 30 декабря 2015 года № 1492 увеличены предельные размеры субсидируемых автопроизводителям затрат на использование энергоресурсов энергоёмкими предприятиями автомобильной промышленности, предельные размеры субсидируемых затрат, связанных с выпуском и поддержкой гарантийных обязательств в отношении колёсных транспортных средств, соответствующих нормам «Евро–4» и «Евро–5», и предельные размеры субсидируемых затрат на содержание рабочих мест.

24 августа 2016 года заместитель Председателя Правительства России Аркадий Дворкович дал указания руководителям ряда министерств, направленные на стимулирование производства и приобретения электромобилей (резолюция № АД–П9–5126).

В рамках выставки «ИННОПРОМ–2016» состоялся круглый стол по развитию электрического автомобильного транспорта в России. Участники обсудили проект программы развития электрического транспорта в России до 2025 года.

Стратегией развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2025 года предложены меры поддержки спроса на электромобили, которые могут включать следующие инициативы, направленные главным образом на сокращение стоимости владения и повышение удобства пользования электромобилями:

- льготы по транспортному налогу;
- введение экологического налога;
- бесплатная парковка в черте города или сокращение времени ожидания на получение индивидуального парковочного места около места проживания;
- доступ на полосы для маршрутных транспортных средств;
- бесплатная зарядка на общественных зарядных станциях;
- льготный тариф при страховании гражданской ответственности владельца транспортного средства;
- льготы при пользовании платными участками автомобильных дорог.

Что касается инфраструктуры, то с 2012 года ПАО «Россети» реализует Всероссийскую программу развития зарядной инфраструктуры для электротранспорта, основной целью которой является создание условий для широкомасштабного внедрения всех видов автономного электротранспорта на территории Российской Федерации. А с 2015 года ПАО «МОЭСК» эксплуатирует зарядные станции российского производства ФОРА, изготовленные Государственным Рязанским приборным заводом.

Минтрансом России и Программой развития ООН при содействии Глобального экологического фонда начиная с сентября 2012 года совместно реализуется проект «Сокращение выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта в городах России», направленный на снижение выбросов в атмосферу парниковых газов посредством улучшения планирования и управления городским транспортом путём создания эффективных систем мониторинга и продвижения экологически чистых видов транспорта. Главными результатами проекта являются демонстрационные проекты в двух городах Российской Федерации – Казани и Калининграде, принятие на федеральном уровне программ и нормативно-правовой базы в поддержку развития устойчивого транспорта в Российской Федерации и успешное распространение информации об опыте и тиражирование элементов демонстрационных проектов.

Данный проект повлиял на разработку и утверждение ряда нормативных правовых актов, которые позволят реализовать все меры по развитию и эксплуатации экологически чистого транспорта на территории России.

К примеру, с 1 ноября 2016 года вступило в силу Постановление Правительства РФ от 27.08.2015 № 890, по которому автозаправки обязаны иметь на своей территории зарядные станции для электромобилей.

Также принят Федеральный закон «Об организации дорожного движения», предусматривающий в том числе возможность введения субъектами Российской Федерации ограничений на въезд автомобильного транспорта низких экологических классов (менее 4-го) в отдельные районы населенных пунктов [4]. 12 июля 2017 года постановлением Правительства Российской Федерации № 832 (Правила дорожного движения) введены новые понятия (электромобиль, гибридный автомобиль, островок безопасности) и новые дорожные знаки: 5.35 «Зона с ограничением экологического класса механических транспортных средств», 5.36 «Зона с ограничением экологического класса грузовых автомобилей», 7.21 «Автозаправочная станция с возможностью зарядки электромобилей», 8.25 «Экологический класс транспортного средства», а также правила их применения (рис. 1).

Данные нововведения позволят вводить ограничения на движение транспортных средств по экологическому классу и гибко «отсекать» экологически «грязные» автомобили. Кроме этого, в последние годы Минтрансом России в Правила дорожного движения внесены значимые изменения в части корректировки понятийного аппарата, касающегося движения велосипедистов.



Рис. 1. «Экологические» дорожные знаки

Заключение

1. Опыт внедрения проектов устойчивого городского транспорта в пилотных городах повлиял на развитие и утверждение ряда нормативных правовых актов, которые позволяют реализовать все меры по развитию и эксплуатации

экологически чистого транспорта на территории России.

2. Проект «Сокращение выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта в городах России» оказал значимое воздействие на включение элементов по устойчивому городскому транспорту, а также по транспортному планированию и сокращению выбросов парниковых газов от автомобильного транспорта, в такие стратегические документы российских городов, как Комплексные схемы организации дорожного движения, Генеральные планы, Программы комплексного развития транспортной инфраструктуры.

3. Резервы снижения выбросов от автотранспорта зависят от управления, включающего современные методы организации дорожного движения, интеллектуальные системы транспорта, телематики, навигации, автономного и автоматического вождения, парковочной политики, приоритета общественного транспорта, от развития электрозарядной и велосипедной инфраструктуры.

Список литературы

1. Распоряжение Росприроднадзора от 01.11.2013 N 6-р "Об утверждении Порядка организации работ по оценке выбросов от отдельных видов передвижных источников"
2. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2018 году». – М.: Минприроды России; НПП «Кадастр», 2019. 844 с.
3. Государственный доклад «О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2016 году». – М.: Минприроды России; НИА-Природа. – 2017. – 760 с.
4. Федеральный закон "Об организации дорожного движения в Российской Федерации и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации" от 29.12.2017 N 443-ФЗ // Собрание законодательства Российской Федерации от 1 января 2018 г. N 1 (часть I) ст. 27

References

1. Order of Rosprirodnadzor of 01.11.2013 N 6-p " about the approval of the Order of the organization of works on assessment of emissions from certain types of mobile sources"
2. State report "on the state and environmental protection of the Russian Federation in 2018". - Moscow: Ministry of natural resources of Russia; nce "Cadastre", 2019. 844 PP.
3. State report "on the state and environmental protection of the Russian Federation in 2016". - Moscow: Ministry of natural resources of Russia; NIA-Nature. - 2017. – 760 p.
4. Federal law "On the organization of road traffic in the Russian Federation and on amendments to certain legislative acts of the Russian Federation" dated 29.12.2017 N 443-FZ / / Collection of legislation of the Russian Federation dated January 1, 2018 N 1 (part I) article 27

УДК 574.4

Оценка состояния атмосферного воздуха примагистральных территорий г. Севастополя

М.А. Косовская[1], Н.В. Лямина[2], Т.К. Хренова[3], Е.С.Каширина [4]

[1,2,3,4] ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Институт ядерной энергии и промышленности, ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299026, РФ

[4] Филиал МГУ им. М.В.Ломоносова в городе Севастополе, ул. Героев Севастополя, 7, г. Севастополь, 299001, РФ

e-mail: [1] sevtania@rambler.ru , [2] BurmistrovaN@mail.ru, [3] hugo1349@mail.ru, [4]e_katerina.05@mail.ru

Статья поступила 27.01.2020 г.; после доработки 29.01.2020 г.

Аннотация

Районами исследования были выбраны три центральные магистрали г. Севастополя с разной степенью антропогенной нагрузки. В ходе исследования был проведен прямой подсчет количества и видов автотранспорта, было проанализировано состояние атмосферного воздуха по уровню акустического загрязнения и основным эксгалатам методом инструментальных замеров. Результаты инструментальных исследований были подтверждены исследованиями методами биоиндикации дендроформ. Все исследуемые параметры показали превышение нормативных показателей, что говорит о невыполнении шумо-газо-пылезащитных функций озеленения в исследуемых районах и требует дополнительных исследований.

Ключевые слова: атмосферный воздух, центральные магистрали, дендроформы, акустическое загрязнение, эксгалаты, биоиндикация, биотестирование, каталаза, пероксидаза.

Analysis of the condition of atmospheric air of the main highways in Sevastopol

M.A. Kosovskaya, N.V. Lyamina, T.K. Hrenova, E.S. Kashirina

[1,2,3,4] Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», Institute of Nuclear Energy and Industry, 7, Kurchatova st., Sevastopol, 299026, RF

4 Branch of MSU in Sevastopol, Heroes of Sevastopol st., 7, Sevastopol, 299001, RF

e-mail: [1] sevtania@rambler.ru , [2] BurmistrovaN@mail.ru, [3] hugo1349@mail.ru, [4] e_katerina.05@mail.ru

Received 27.01.2020 y.; received in final form 29.01.2020 y.

Abstract

The object of the study was selected three central highways of the city of Sevastopol with varying degrees of anthropogenic load. In the course of the research, the state of the atmospheric air was analyzed by the level of acoustic pollution and the main exhalates by the method of instrumental measurements. The results of instrumental studies were confirmed by the deindroform bioindication methods. Three types of trees with varying degrees of gas resistance were chosen as the material for research.

Keywords: atmospheric air, central highways, dendroforms, acoustic pollution, exhalates, bioindication, bioassay, catalase, peroxidase

Введение

Загрязнения атмосферного воздуха относится к тем приоритетным факторам, которые влияют не только на здоровье людей, состояние растительных форм, но и приводит к необратимым изменениям в состоянии экосистем в целом. Причем на некоторые аэротехногенные загрязнения растения реагируют быстрее, чем

начинает ощущать человек. Уровень загрязнения атмосферы города Севастополя формируется в зависимости от химического состава, технологических параметров источников выбросов вредных (загрязняющих) веществ, выбросов автотранспорта и их распределения на территории города, природных условий, а также режима метеорологических величин и явлений [1].

На перенос и рассеивание вредных примесей, поступающих в атмосферу, существенное влияние оказывают метеорологические условия, такие как: наличие осадков, туманов, сила ветра и его направление и т.д. В отдельные периоды, когда эти условия способствуют накоплению вредных веществ в нижнее им слое атмосферы, концентрации примесей в воздухе могут резко возрастать [1].

По данным Межрегионального управления Росприроднадзора по Республике Крым и городу Севастополю в 2018 году суммарные выбросы загрязняющих веществ от стационарных источников в атмосферный воздух на территории города Севастополя составили 3,034 тыс. тонн [1].

Основными источниками загрязнения атмосферного воздуха города Севастополя за последние несколько лет являются объекты теплоэнергетического комплекса и автотранспорт. Контроль за качеством атмосферного воздуха осуществляется на 4-х административных территориях города, включая маршрутные и подфакельные исследования в зоне влияния промышленных предприятий, автомагистрали в зоне жилой застройки и на стационарном посту. Мониторинг загрязнения атмосферного воздуха города Севастополя проводится на одном стационарном посту Государственной наблюдательной сети в зоне ответственности Федерального государственного бюджетного учреждения «Крымское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды»

По данным ФГБУ «Крымское УГМС» в 2018 году всего было произведено исследование 1427 проб атмосферного воздуха (в 2017 г. – 1225), из них – 572 на стационарном посту (в 2017 г. – 651), 36 – на автомагистралях (в 2017 г. – 48) и 819 маршрутных и подфакельных исследований в зоне влияния промпредприятий (в 2017 г. – 526). В воздухе города Севастополя за 2018 год максимально-разовые концентрации достигали по взвешенным веществам 3,6 ПДК (май); по диоксиду серы 0,08 ПДК (апрель); оксиду углерода 0,48 ПДК (декабрь); диоксид азота 0,28 ПДК (январь); по формальдегиду 0,46 ПДК (апрель). [1].

Общее количество исследований на автомагистралях в 2018 году составило 36, превышений ПДК не выявлено. Однако наблюдается резкое увеличение количества автомобилей на дорогах города. За последние 3 года число автомобилей в Севастополе вырос на 30%. Если в 80-е годы было порядка 80 автомобилей на тысячу жителей, в 90-е годы – 200 автомобилей, то на сегодняшний день ориентировочно 350 автомобилей [1]. Что приводит к необходимости более жесткого контроля состояния атмосферного воздуха автомобильных дорог.

Материалы и методы исследований

Объектом исследования были выбраны три центральные магистрали г. Севастополя с разной степенью антропогенной нагрузки. Были выбраны десять точек в Ленинском, Гагаринском и Нахимовском административных районах: на пересечении улиц Горпищенко и Костромской (Т1), на ул. Истомина (Т2), на пересечении улиц Героев Севастополя и Николая Островского (Т3), на ул. Вакуленчука (Т4), на ул. Степаняна (Т5), на площади Комбата Неустроева (Т6), на проспекте Генерала Острякова (Школа № 22 им. Н.А. Острякова (Т7), «СевГорРынХоз» 5-й километр (Т8) и на ул. Гоголя (Т9), пересечение улиц Советская и Сергеева-Ценского (Т10). В ходе исследования был проведен прямой подсчет количества и видов автотранспорта в осенний, зимний и весенний периоды, в будние, выходные дни, в утренние, дневные и вечерние часы. По результатам чего была построена гистограмма условного ранжирования точек в зависимости от степени антропогенной нагрузки. (Рис.1). Кроме того, в ходе проведения исследований для более качественного учета степени загрязнения был построен профильный рельеф исследуемых дорог и учтена роза ветров. Построенный рельеф предполагает накопления загрязняющих веществ по всем исследуемым точкам дороги № 1. Учитывая розу ветров на дороге №2, предполагается увеличение концентраций загрязняющих веществ в районе 5-го километра за счет большого угла наклона. Дорога №3 характеризуется отсутствием аномальных завихрений и накоплений концентраций загрязняющих веществ.

В ходе исследований было проанализировано состояние атмосферного воздуха по уровню акустического загрязнения и основным эксгалатам методом инструментальных замеров.

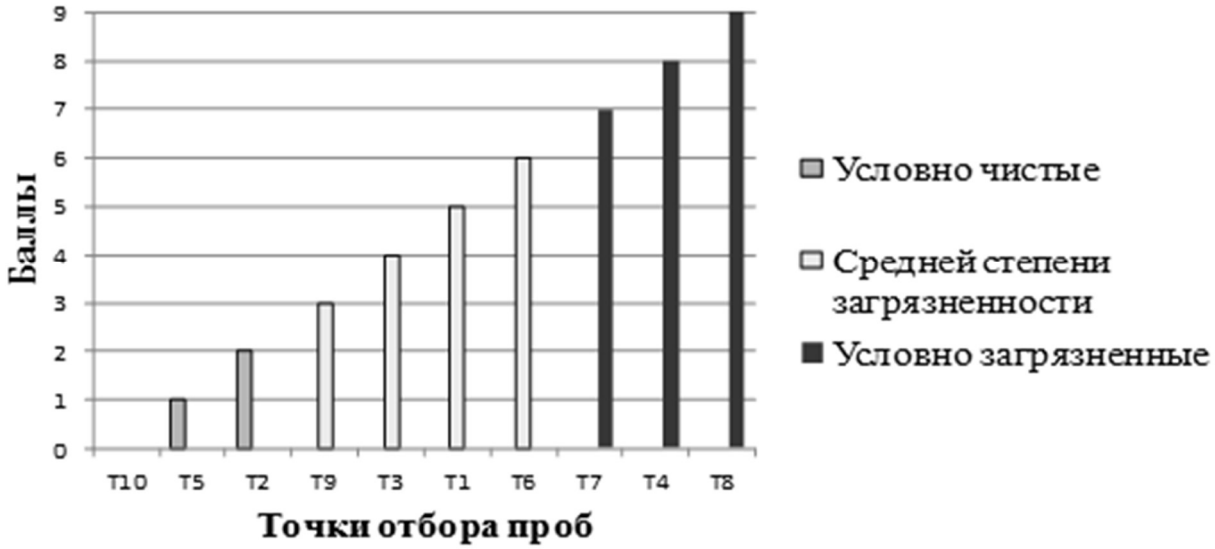


Рис. 1. Ранжирование точек в зависимости от степени антропогенной нагрузки.

Результаты и их обсуждение

Результаты замеров 2019 годы, аналогичны полученным данным в 217,18 годах. По результатам замеров акустического загрязнения было выявлено: наиболее высокий уровень шума в точках Т3 (77 дБА), Т6 (77 дБА), Т8 (81 дБА), что свидетельствует о превышении нормативных показателей по уровню шума для населенных пунктов (70 дБА) (рис. 2-3) [2].

В ходе исследования были проведены замеры загрязнения воздуха по основным поллютантам (рис. 4-5). Замеры проводились осенью и зимой 2018 г, весной 2019 г. воздухозаборным устройством УГ-2.

Наиболее загрязненной точкой по всем исследуемым параметрам оказалась точка Т8, а наименее загрязненной – Т5. По всем остальным точкам были выявлены незначительные превышения нормативных показателей.

Данные замеров подтвердили условное ранжирование точек.

Результаты инструментальных исследований были подтверждены исследованиями методами биоиндикации дендроформ. В качестве материала для исследований было выбрано три вида деревьев с разной степенью газоустойчивости, произрастающие во всех исследуемых точках: софора японская (*Styphnolobium japonicum (L.) Schott*), клен остролистный (*Acer platanoidcs L.*) и тополь пирамидальный (*Populus nigra var. italica Munchh.*) (рис. 6).

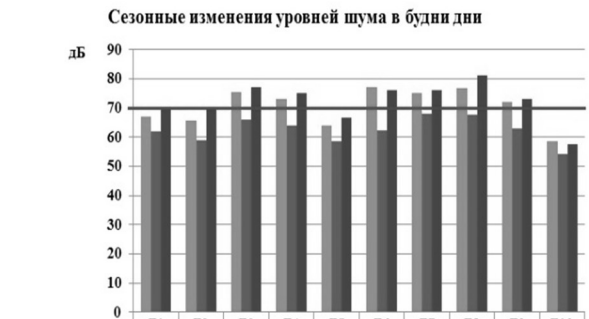
По результатам многолетних исследований было выявлено, что софора японская (*Styphnolobium japonicum (L.) Schott*) является наиболее устойчивой дендроформой ко всем имеющимся в атмосферном воздухе г.Севастополя эксгалатам, а тополь пирамидальный (*Populus nigra var. italica Munchh.*) наиболее чувствительная дендоформа, что позволяет использовать данное растение в качестве тест-объекта при биоиндикации.

Для оценки качества атмосферного воздуха примагистральных территорий в исследуемых точках были проанализированы следующие показатели: каталаза (КФ 1.11.1.6), пероксидаза (КФ 1.11.1.7), пыль.

По результатам анализов на определение ферментной активности каталазы наиболее загрязненной точкой оказалась Т8, наименее загрязненной – Т5 и Т2 (рис. 7-9).

По результатам анализов на определение ферментной активности пероксидазы наиболее загрязненной точкой оказалась Т8, наименее загрязненной – Т5 (рис. 10-12).

При исследованиях содержания пыли на листовой поверхности дендроформ были получены низкие концентрации, что можно объяснить хорошей циркуляцией воздушных масс.



	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Осенний период	67	65,5	75,5	73,1	64	77	75,2	76,7	71,9	58,7
Зимний период	62	58,8	66	63,8	58,7	62,4	68	67,7	63	54
Весенний период	70,1	69,9	77	75	66,6	75,9	76,2	81	72,9	57,5



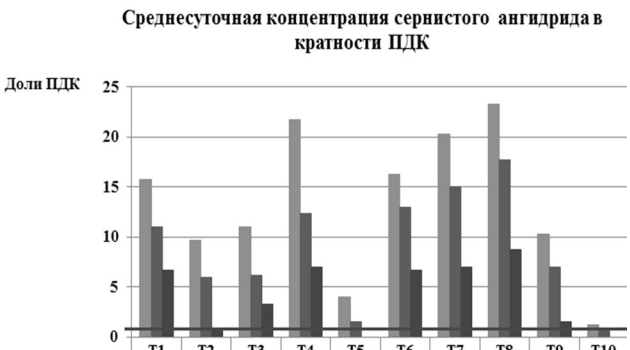
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Осенний период	62,8	61,9	72,2	68,7	60,5	68	71,7	73,7	66,6	56,2
Зимний период	59	57,1	64,5	62,5	56,1	62,1	64,1	66	60,6	52,2
Весенний период	68,1	65,8	76,3	71,1	63	72,5	73,9	76,8	71,3	57,1

Рис. 2-3. Сезонные изменения уровней шума в будни и выходные дни 2018-2019 гг.



	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Осенний период	3,8	3,03	3,6	4,4	1,9	4,1	4,25	4,8	3,2	0,9
Зимний период	2,8	1,9	2,9	3,5	1,2	3,1	3,3	3,7	2,3	0,48
Весенний период	2,01	1,2	2,05	2,65	0,7	2,2	2,25	2,7	1,3	0,33

Рис. 4. Среднесуточная концентрация оксида углерода в воздухе примагистральных территорий (в кратности ПДК) 2018 -2019 гг.



	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
Осенний период	15,7	9,7	11	21,7	4	16,3	20,3	23,3	10,3	1,25
Зимний период	11	6	6,2	12,3	1,56	13	15	17,7	7	0,56
Весенний период	6,7	0,56	3,3	7	0	6,7	7	8,7	1,56	0

Рис. 5. Среднесуточная концентрация сернистого ангидрида в воздухе примагистральных территорий (в кратности ПДК) 2018 -2019 гг.

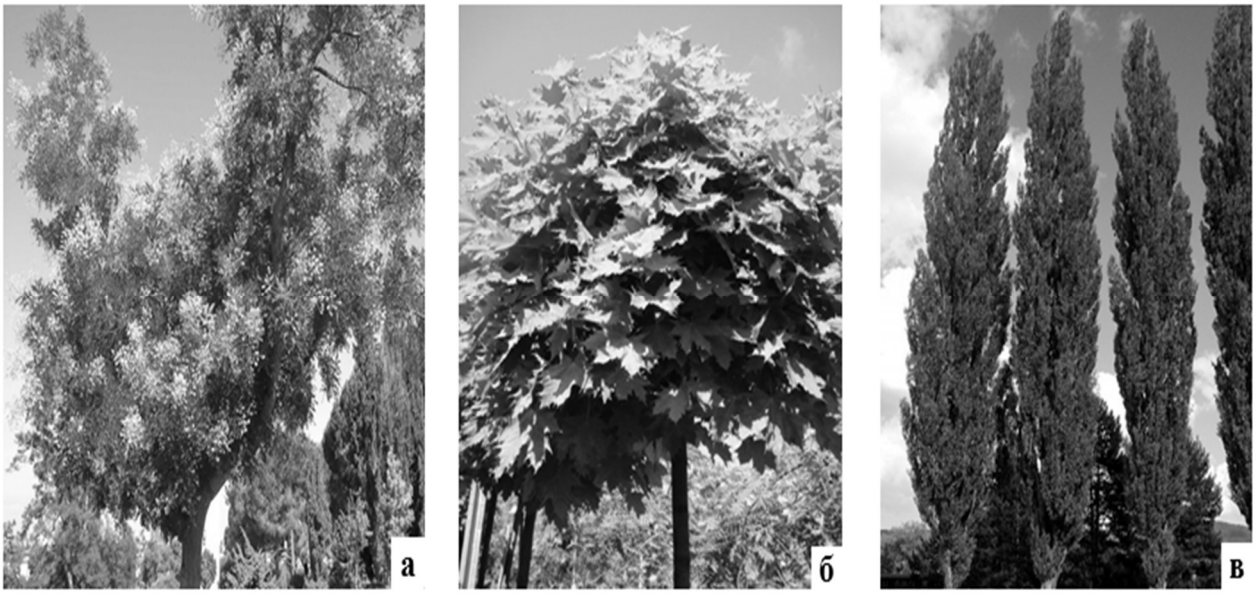


Рис. 6. Исследуемые деревья : а) софора японская (Styphnolobium japonicum (L.) Schott); б) клен остролистный (Acer platanoidcs L.); в) тополь пирамидальный (Populus nigra var. italica Munchh.)

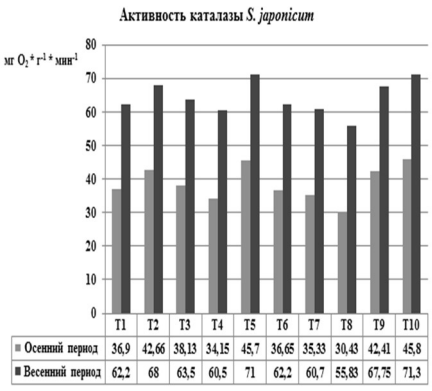


Рис. 7. Динамика ферментной активности каталазы *S. japonicum* 2018-2019 гг.

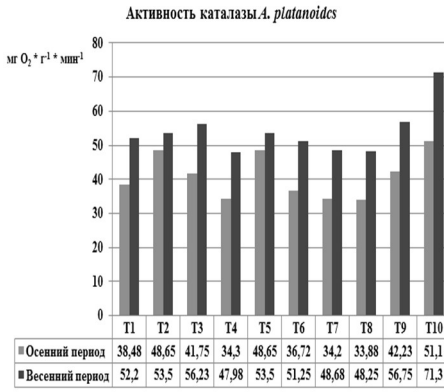


Рис. 8. Динамика ферментной активности каталазы *A. platanoidcs* 2018-2019 гг.

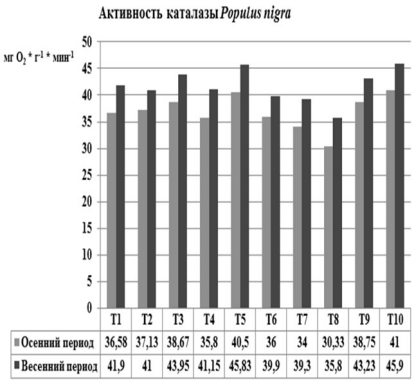


Рис. 9. Динамика ферментной активности каталазы *Populus nigra* 2018-2019 гг.

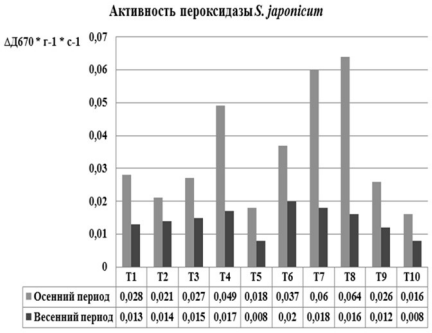


Рис. 10. Динамика ферментной активности пероксидазы *S. japonicum* 2018-2019 гг.

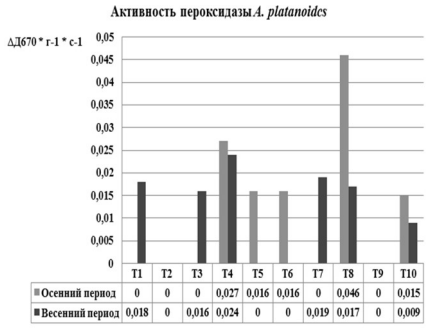


Рис. 11. Динамика ферментной активности пероксидазы *A. platanoidcs* 2018-2019 гг.

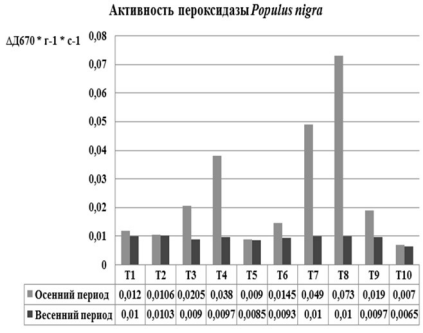


Рис. 12. Динамика ферментной активности каталазы *Populus nigra* 2018-2019 гг.

Заключение

Таким образом, при проведении анализа качества атмосферного воздуха с помощью инструментального метода и метода дендроиндикации, можно сделать следующие выводы: условно загрязненной точкой является Т8 (СевГорРынХоз 5-ый км), условно чистой Т5 (ул. Степаняна), все исследуемые параметры показали превышение нормативных показателей, что говорит о невыполнении шумо-газо-пылезащитных функций озеленения в исследуемых районах и требует дополнительных исследований.

Сравнивая полученные результаты со статистическими данными [1], можно сделать вывод о недостаточной достоверности проведения мониторинговых исследований.

Кроме того, все исследуемые параметры показали превышение нормативных показателей, что говорит о возможном невыполнении шумо-газо-пылезащитных функций исследуемых районов озеленения.

В качестве природоохранных мероприятий следует увеличить зону озеленения за счет многоуровневой посадки, с использованием кустарниковых пород и газоустойчивых дендроформ, таких как - софора японская (*Styphnolobium japonicum (L.) Schott*), робиния ложноакациевая (*Robinia pseudoacacia L.*), гледичия трёхколючковая (*Gleditsia triacanthos L.*). Усилить контроль за передвижными источниками. Увеличить количество мониторинговых замеров и количество исследуемых параметров.

Список литературы

1. Ежегодный доклад о состоянии и об охране окружающей среды города федерального значения Севастополя за 2018 год |Электронный ресурс|. - URL: http://ecosev.ru/images/gosdoklad/converted_file_eb8f7bea.pdf Ежегодный доклад о состоянии и об

охране окружающей среды города федерального значения Севастополя за 2018 год, утвержден приказом Севприроднадзора от от 14.06.2019 № ПР/238
2. Санитарные нормы СН 2.2.4/2.1.8.562-96 «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки».

References

1. The annual report on the state and environmental protection of the city of federal significance of Sevastopol for 2018 | Electronic resource |.- URL: http://ecosev.ru/images/gosdoklad/converted_file_eb8f7bea.pdf The annual report on the state and environmental protection of the city of federal significance of Sevastopol for 2018, approved by order of the Sevprirodnadzor dated June 14, 2019 No. PR / 238
2. Sanitary norms SN 2.2.4 / 2.1.8.562-96 “Noise at workplaces, in residential, public buildings and in residential areas”.

УДК 574.4

Анализ состояния атмосферного воздуха ООПТ, на примере природного парка регионального значения «Максимова дача»

М.А. Косовская[1], Н.В. Лямина[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Институт ядерной энергии и промышленности, ул. Курчатова, 7, г. Севастополь, 299026, РФ
e-mail: [1] sevtania@rambler.ru , [2] BurmistrovaN@mail.ru

Статья поступила 10.02.2020 г.; после доработки 12.02.2020 г.

Аннотация
Объектом исследования выбран природный парк регионального значения «Максимова дача». В процессе исследования был проведен мониторинг состояния атмосферного воздуха на территории парка. Выявлены превышения нормативных показателей по исследуемым эксгалатам: CO, NO_2, NO, SO_2, взвешенным веществам. Был проведен анализ факторов, влияющих на состояние природного комплекса в целом и атмосферного воздуха в частности.

Ключевые слова: особо охраняемая природная территория (ООПТ), экосистема, экологический мониторинг, атмосферный воздух, природный парк «Максимова дача».

Assessment of the state of atmospheric air in a natural park of regional significance «Maximov dacha»

Kosovskaya M.A., Lyamina N.V.
Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Sevastopol State University», Institute of Nuclear Energy and Industry, 7, Kurchatova st., Sevastopol, 299026, RF
e-mail: [1] sevtania@rambler.ru , [2] BurmistrovaN@mail.ru

Received 10.02.2020 y.; received in final form 12.02.2020 y.

Abstract
In the course of the study, monitoring of the state of the atmospheric air of the natural park of regional significance "Maximova dacha" was conducted. Exceeded MPC values for test pollutants: CO, NO2, NO, SO2, suspended solids. An analysis was made of factors affecting the state of the natural complex as a whole and the atmospheric air in particular.

Keywords: specially protected natural area (SPNA), ecosystem, environmental monitoring, atmospheric air, natural park "Maximova dacha".

Введение

Приоритетным аспектом в природоохранной составляющей окружающей среды является контроль состояния окружающей среды [1].

Состояние экологических систем городских особо охраняемых природных территорий – это чувствительный индикатор степени экологического благополучия территории города, так как такие объекты в условиях города испытывают не только огромное многофакторное антропогенное воздействие, но и аккумулируют основные загрязняющие вещества. По состоянию окружающей среды на данном объекте можно судить о состоянии окружающей среды в г. Севастополе в целом [2].

Региональный ландшафтный парк местного значения «Максимова дача» расположен в г. Севастополь (Ленинский район). Объект организован в соответствии с решением Севастопольского городского совета от 18.06. 2013 г. № 5678 «О создании Регионального ландшафтного парка местного значения «Максимова дача». Постановлением Правительства Севастополя от

25.05. 2015г. № 417 ПП «Об утверждении перечня особо охраняемых природных территорий регионального значения, расположенных в городе Севастополе» региональный ландшафтный парк местного значения «Максимова дача» был преобразован в природный парк регионального значения «Максимова дача». Постановлением Правительства Севастополя № 407-ПП от 29.04. 2016 г. «Об утверждении Положения о природном парке регионального значения «Максимова дача» был утвержден регламент и условия пользования этим объектом.

Целью создания природного парка регионального значения «Максимова дача» явилось сохранение историко-культурных объектов Максимой дачи, поддержание и восстановление общего экологического баланса территории, ландшафтного и биологического разнообразия, генофонда животного и растительного мира.

Данный природный парк «Максимова дача» является уникальным для города Севастополя объектом природоохранного и историко-культурного значения ввиду наличия сохранившихся остатков усадебного комплекса с ландшафтным парком. Ландшафтный парк был создан по проекту архитектора и художника В.А. Фельдмана. В границах «Максимовой дачи» и на рядом расположенных к ней территориях находятся объекты культурного наследия разных исторических периодов, а также воинские захоронения. В Крымскую войну, в период первой обороны Севастополя (1854-1855 гг.) в районе Хомутовой балки находились рвы и площадки британских палаток, и бараков [3].

Целью настоящей работы является проведение экологического обследования особо охраняемой природной территории г. Севастополя – природного парка регионального значения «Максимова дача» с учетом состояния всех его сред. В части касаемо атмосферного воздуха в соответствии с целью была поставлена задача проведения мониторинга состояния атмосферного воздуха по основным эксгалатам.

Районом исследования был выбран природный парк регионального значения «Максимова дача», расположенный в Ленинском районе города Севастополя, в балка Хомутовой в зоне зеленых насаждений общего пользования и частично в проектной зоне малоэтажной жилой застройки в соответствии с Генеральным планом развития города Севастополя до 2025 года. Исходя из специфики расположения природного парка «Максимова дача» основным источником воздействия на атмосферный воздух и биоту является автотранспорт.

Рельеф парка «Максимова дача» сложен и разнообразен. Исследуемый объект расположен в балке и представляет собой неровную местность с большими перепадами высот. Колебание высот составляет 72.0 м, с 88.3 м, до 160.3 м, изменение высоты увеличивается с юга-востока на северо-запад, уклон поверхности не более 20^0. Что обуславливает высокий потенциал рассеивания эксгалатов, попадающих на данную территорию.

Климат исследуемой территории – субтропический, среднемесячная температура воздуха в течение всего года является положительной. Самый холодный месяц – январь (средняя температура +4.7ºС), самый тёплый – июль (+38.2ºС). Атмосферные осадки в течение года выпадают довольно равномерно: от 204 до 222 мм/гг. Наиболее сухой месяц в году – май. Район исследования достаточно изучен в гидрометеорологическом отношении. Климатическая характеристика района составлена по данным наблюдений на ближайших действующих метеорологических станциях – Севастополь и Херсонесский маяк.

Материалы и методы исследований

Предметом исследований в данной работе является состояние атмосферного воздуха природного парка регионального значения «Максимова дача».

Исследования проводились с сентября 2018 г. по настоящее время. Отбор проб атмосферного воздуха проводился еженедельно в одно и тоже время (с 10:40 до 14:15) (рис.1-3).

Газоанализаторы, с помощью которых проводился экологический мониторинг атмосферного воздуха: ЭЛАН-CO-50 (№10.СП100228.18); ЭЛАН-NO (№ 05.1831.18); ЭЛАН-NO_2 (№ 05.1830.18); ЭЛАН-SO_2 (№ 05.1832.18) и аспиратор ПУ-4Э исп.1 (RU.C.29.010.A № 51482). Данное оборудование предназначено для измерения массовой концентрации одного из исследуемых нами компонентов: CO, NO, NO_2, SO_2, а также взвешенных веществ согласно принятым руководствам и методикам [4-6]. Был определен маршрут исследования, протяженность которого составила 3500 м. В ходе исследования также были определены координаты каждой из исследуемых точек.



Рис. 1-3. Отбор проб атмосферного воздуха на территории природного парка регионального значения «Максимова дача» (фото авторов)

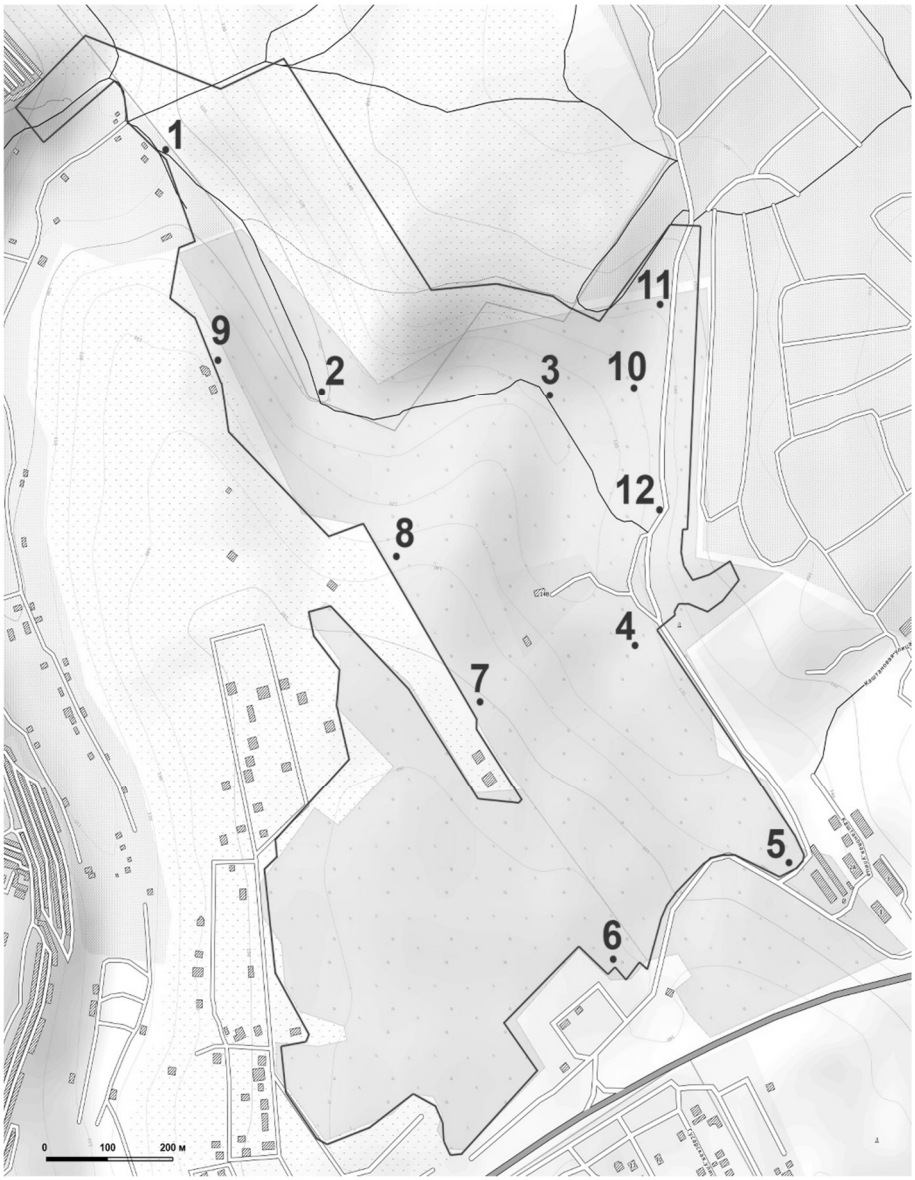


Рис.4. Места отбора проб атмосферного воздуха на территории природного парка «Максимова дача»

Результаты и их обсуждение

Результаты проведенных исследований по оксиду углерода (CO) за весь исследуемый период представлен на рис. 5.

Превышений показателя $ПДК^{CO}_{м.р.}$ (4,0 мг/м^3) не выявлено, во всех 12 исследуемых точках, атмосферный воздух по данному показателю соответствует санитарно-гигиеническим требованиям.

Результаты проведенных исследований по диоксиду азота (NO_2) представлены на рис. 6.

Превышения показателя $ПДК^{NO2}_{м.р.}$ (0.16 мг/м^3) не выявлены, во всех 12 исследуемых точках, атмосферный воздух по данному показателю соответствует санитарно-гигиеническим требованиям.

В результате проведенных исследований были получены данные по оксиду азота (NO) представленные на рис. 7.

Превышения показателя $ПДК^{NO}_{м.р.}$ (0.32 мг/м^3) не выявлены, во всех 12 исследуемых точках, атмосферный воздух по данному показателю соответствует санитарно-гигиеническим требованиям.

Так же были получены данные по диоксиду серы (SO_2). В результате проведенных исследований превышений нормативного показателя по данному веществу не выявлено.

В результате проведенных исследований были получены данные по взвешенным веществам, представленные на рис.8. 19 октября и 7 декабря по результатам замеров наблюдалось превышение показателя $ПДК_{взвешенных\ веществ.}$ (0,4 мг/м^3) в точках №9 (N44.56355; E33.53918) и №10 (N44.56343; E33.54739) в 2.42-3.99 раза, атмосферный воздух по данному показателю не соответствует санитарно-гигиеническим требованиям.

После оценки суммарного уровня загрязнения с учетом эффекта суммации выявлено, что 16 ноября в точке №3 (N44.334759; E33.324394) наблюдалось превышение нормативных показателей в 1.48 раз. В остальные дни превышение не выявлено. Расчет проводился с учетом фоновых концентраций, розы ветров и рельефа местности.

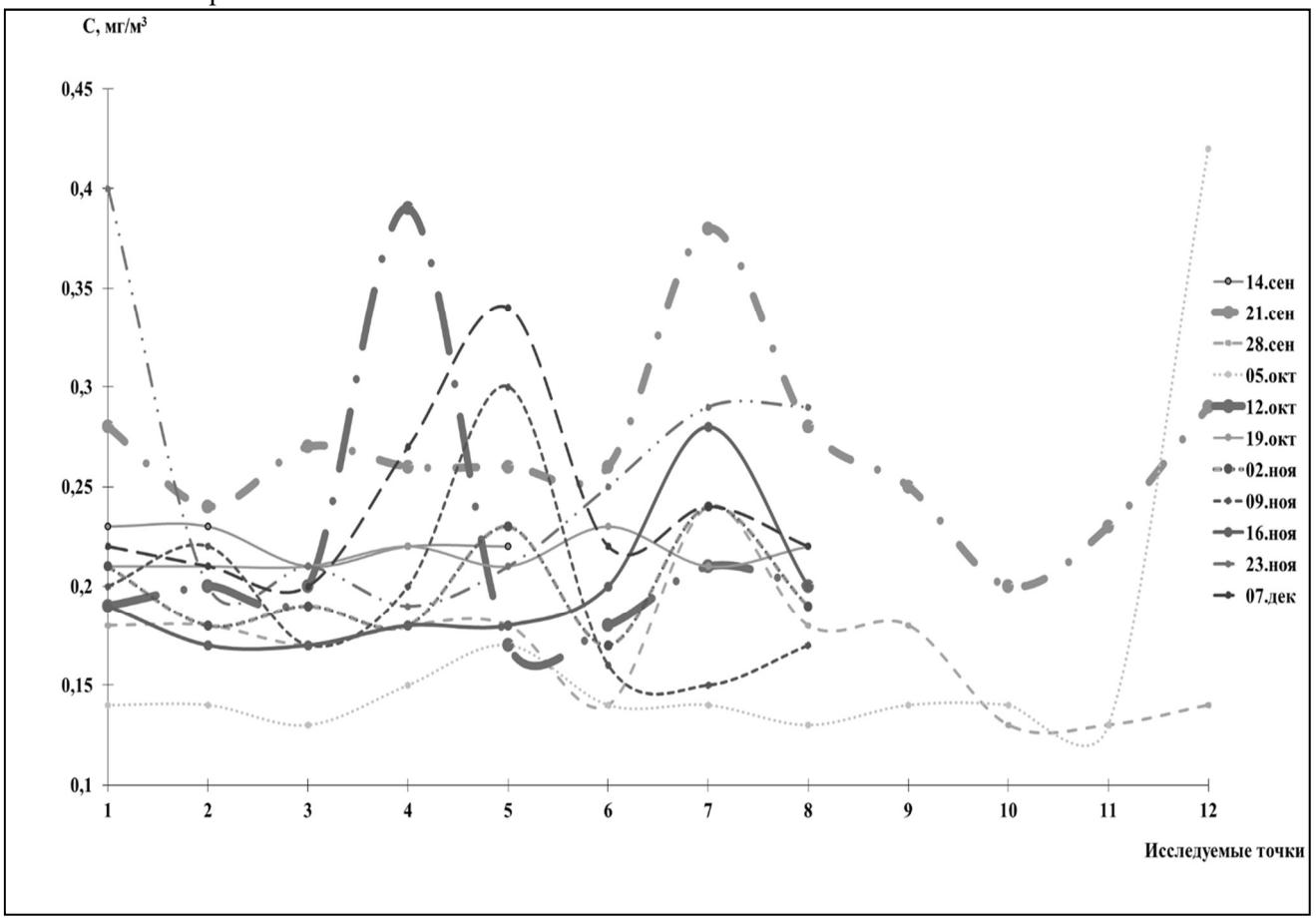


Рис.5. Концентрация оксида углерода (CO) в исследуемых точках в зависимости от даты измерения

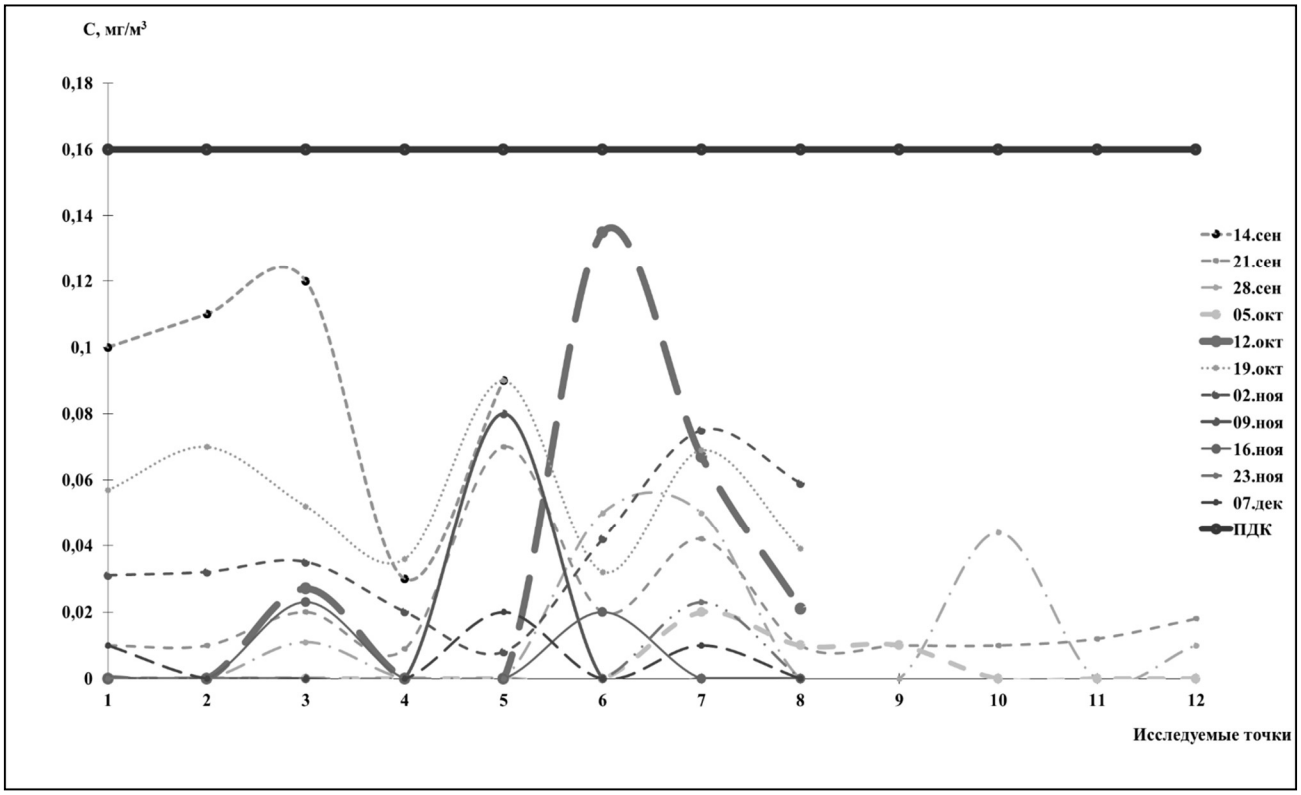


Рис.6. Концентрация диоксида азота (NO_2) в исследуемых точках в зависимости от даты измерения

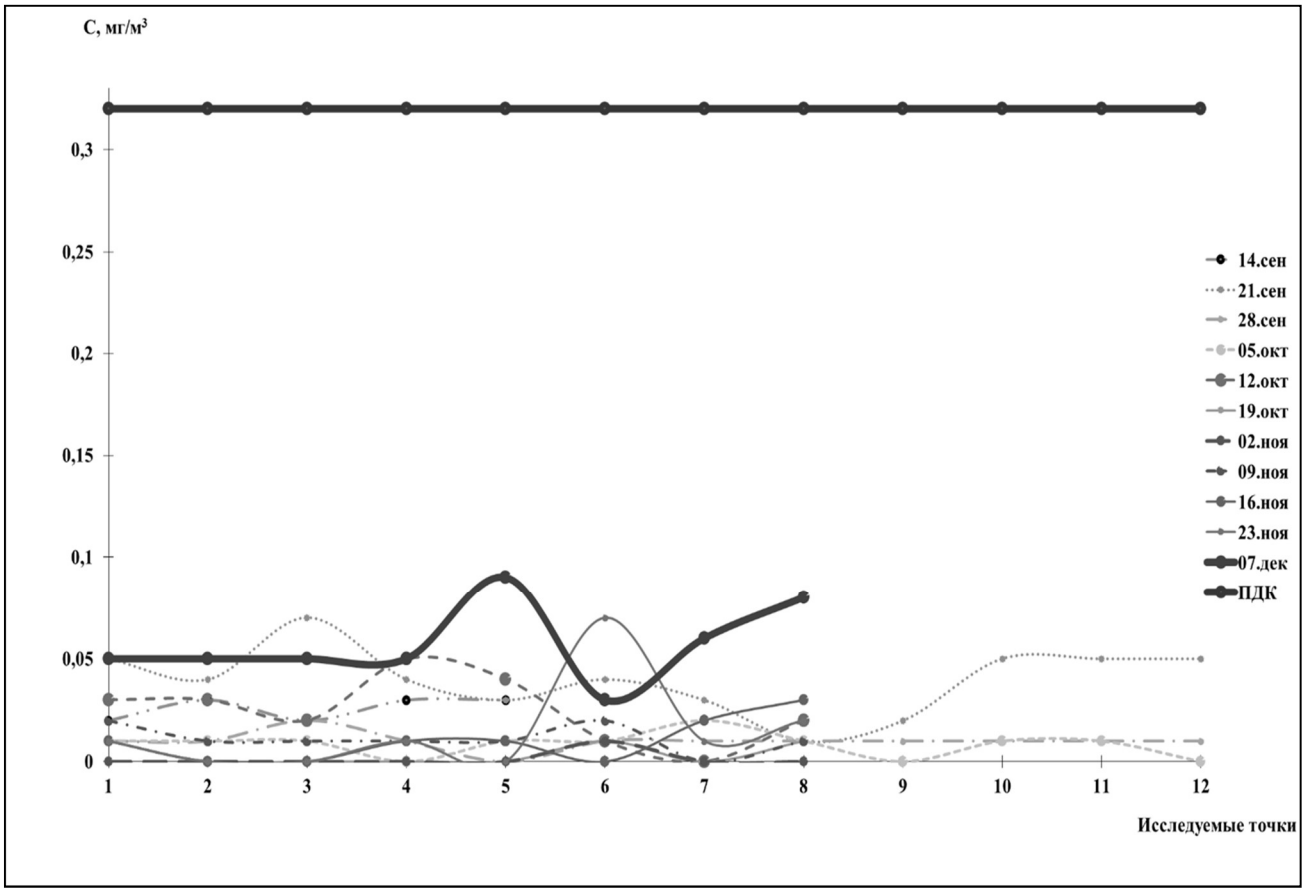


Рис.7. Концентрация оксида азота (NO) в исследуемых точках в зависимости от даты измерения

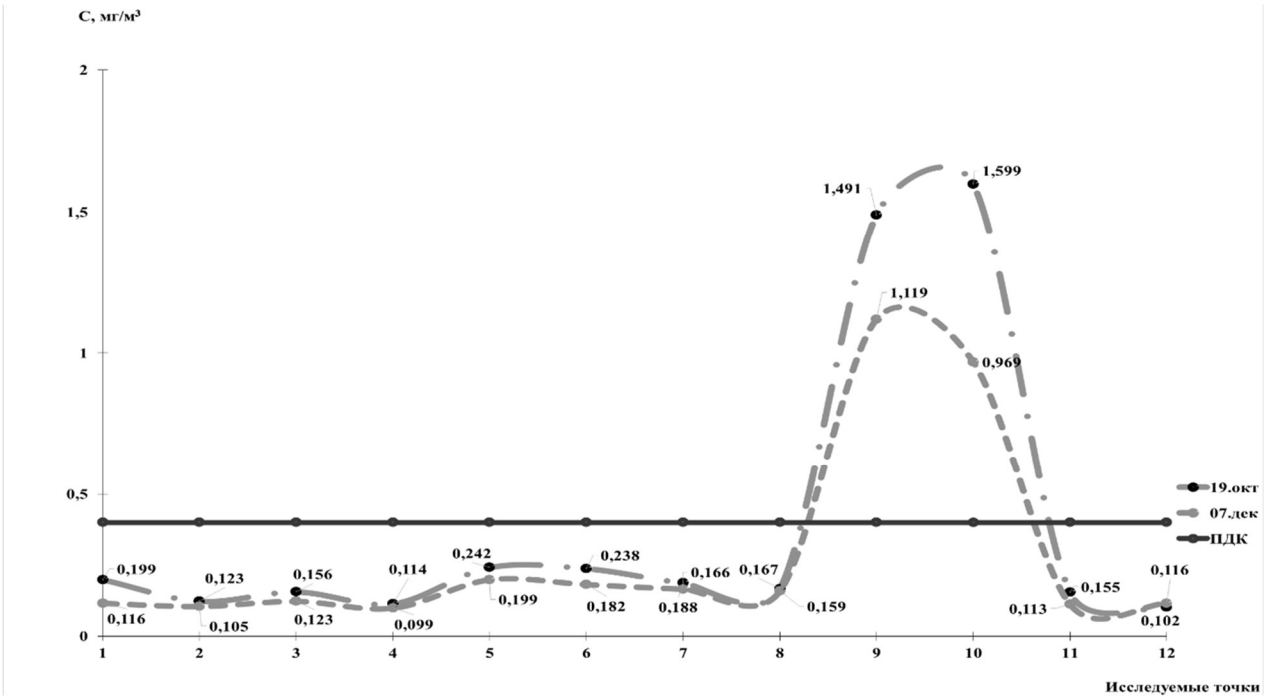


Рис.8. Концентрация взвешенных веществ в исследуемых точках в зависимости от даты измерения

Заключение

В ходе проведенных инвентаризаций источников загрязнения атмосферного воздуха было выявлено, что основным источником воздействие является автотранспорт.

За время исследования не выявлены превышения показателей по CO, NO_2, NO, SO_2 во всех 12 исследуемых точках. Атмосферный воздух по данным показателям соответствует санитарно-гигиеническим требованиям.

19 октября и 7 декабря по результатам замеров наблюдалось превышение показателя ПДКвзвешенных веществ. (0,4 мг/м^3) в точках №9 (N44.56355; E33.53918) и №10 (N44.56343; E33.54739) в 2.42-3.99 раза, атмосферный воздух по данному показателю не соответствует санитарно-гигиеническим требованиям.

После оценки суммарного уровня загрязнения с учетом эффекта суммации выявлено, что 16 ноября в точке №3 (N44.334759; E33.324394) наблюдалось превышение нормативных показателей в 1.48 раз. В остальные дни превышение не выявлено.

Список литературы

1. Основы природопользования и энергоресурсосбережения [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.В. Денисов [и др.]; Под ред. В.В. Денисова. — Электрон. дан. – Санкт-Петербург: Лань, 2019. – 408 с.– Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/113632. – Загл. с экрана.
2. Кузнецов, В.А. Многокритериальная оценка состояния лесных экосистем городских ООПТ по результатам комплексного экологического мониторинга на основе метода функций желательности. [Электронный ресурс] / В.А. Кузнецов, О.В. Беднова, Ю.Ю. Андрюшин. – Электрон. дан. // Успехи в химии и химической технологии. – 2014. – № 4(153) том 28. – С. 51-54. – Режим доступа: http://e.lanbook.com/journal/issue/295975 – Загл. с экрана.
3. Постановление Правительства города Севастополя от 29 апреля 2 016 г. №407-ПП "Об утверждении положения о природном парке регионального значения «Максимова дача»"
4. РД 52.04.186-89 «Руководство по контролю загрязнения атмосферы».
5. СанПиН 2.1.6.1032-01 «Гигиенические требования к обеспечению качества атмосферного воздуха населенных мест. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы».
6. ГН 2.1.6.1338-03 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест. Гигиенические нормативы»

References

1. Fundamentals of nature management and energy conservation [Electronic resource]: a training manual / V.V. Denisov [et al.]; Ed. V.V. Denisova. - The electron. Dan. - St. Petersburg: Doe, 2019. - 408 pp.

- Access mode: https://e.lanbook.com/book/113632. - Zagl. from the screen.
2. Kuznetsov, V.A. A multicriteria assessment of the state of forest ecosystems in urban protected areas based on the results of integrated environmental monitoring based on the desirability functions method. [Electronic resource] / V.A. Kuznetsov, O.V. Bednova, Yu.Yu. Andryushin. - Elektron. Dan. // Advances in chemistry and chemical technology. - 2014. - No. 4 (153) volume 28. - S. 51-54. - Access mode: http://e.lanbook.com/journal/issue/295975 - Zagl. from the screen.
3. Decree of the Government of the city of Sevasto Pole dated April 29, 2016 No. 407-PP "On approval of the provision on the natural park of regional significance" Maximova Dacha ""
4. RD 52.04.186-89 "Guidelines for the control of air pollution."
5. SanPiN 2.1.6.1032-01 “Hygienic requirements for ensuring the quality of atmospheric air in populated areas. Sanitary and epidemiological rules and regulations. "
6. GN 2.1.6.1338-03 “Maximum allowable concentrations (MPC) of pollutants in the atmospheric air of populated areas. Hygiene Standards "

УДК 628.386

Ресурсосберегающие технологии снижения уровня минерализации в водооборотных системах

Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук

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

Статья поступила 07.02.2020 г.; после доработки 10.02.2020 г.

Аннотация

В работе представлены результаты изучения процессов сорбции хлорид- и сульфат-анионов на аниоците АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -формах. Показано, что емкость ионита выше в CO_3^{2-} -форме как по хлоридам, так и по сульфатам. Установлено, что при сорбции хлоридов и сульфатов на аниоците АВ-17-8 в основной форме, происходит увеличение щелочности воды, что в присутствии ионов жесткости обеспечивает её эффективное умягчение. Технология может быть перспективна при подготовке воды для водооборотных систем охлаждения в промышленности, энергетике, в коммунальных хозяйствах.

Ключевые слова: деминерализация, ионный обмен, сульфаты, умягчение, хлориды.

Resource-saving technologies for reducing the mineralization level in water-circulation systems

G.V. Kucherik, Yu.A. Omelchuk

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

Received 07.02.2020 y.; received in final form 10.02.2020 y

Abstract

The paper presents the results of a study of the sorption processes of chloride and sulphate anions on anionite AB-17-8 in OH^- and CO_3^{2-} forms. It was shown that the ion exchanger capacity is higher in the CO_3^{2-} - form both in chlorides and in sulphates. It was found that during sorption of chlorides and sulphates on anionite AB-17-8 in the main form, the alkalinity of water increases, which in the presence of hardness ions ensures its effective softening. The influence of the salt composition of water on the processes of softening and demineralization using anion-exchange resins is determined.

Keywords: demineralization, ion exchange, sulfates, softening, chlorides.

Введение

Проблема выделения из воды минеральных солей является достаточно сложной. Существующие методы обессоливания воды, такие как обратный осмос, электродиализ и ионный обмен характеризуются образованием значительных объемов жидких отходов. В случае мембранных процессов – это концентраты с содержанием солей на уровне – 5 г/дм^3 [1], а в случае ионного обмена – это кислые, щелочные и нейтральные растворы, с содержанием солей до 100 г/дм^3 [2]. Как правило, эти жидкие отходы вопреки существующим требованиям сбрасываются в природные водоемы, что приводит к их засолению.

Поэтому проблема выделения минеральных солей из воды является актуальной как при хозяйственно-питьевом водоснабжении так и в водопользовании на промышленным предприятиях и электростанциях. В целом, высокий уровень минерализации приводит к существенному ухудшению качества водооборотных систем АЭС, к стимулированию коррозионных процессов, которые сопровождаются высоким уровнем

загрязненности сточных вод и разрушением трубопроводов теплообменников [3].

Постановка задачи

Сточные воды с повышенной минерализацией характеризуется достаточно высокой жесткостью, щелочностью и высоким содержанием сульфатов. В отдельных случаях концентрация хлоридов также достигает достаточно высоких значений.

В этой связи интересным может быть вариант очистки воды, основанный на выделении хлоридов и сульфатов на анионите в основной форме.

При этом при замене хлорид- и сульфат-анионов на гидрооксид анионы произойдет увеличение pH воды. А при подщелачивании воды, очевидно, будет происходить её умягчение.

При этом целесообразно воду вначале пропускать через ионит, а потом отстаивать в осветлителе со взвешенным слоем осадка.

Преимущество данного подхода состоит в том, что основной реагент будет расходоваться только на регенерацию анионита. Умягчение будет происходить за счет подщелачивания воды на анионите. При традиционном подходе необходимо воду обрабатывать основным реагентом при умягчении воды. А при выделении хлоридов и сульфатов на анионите необходимо расходовать основной реагент так же и на регенерацию анионита. Кроме того, в этом случае нужно решать проблему нейтрализации сильнощелочной воды, тогда как в предложенном варианте при умягчении воды связываются гидрооксид и карбонат анионы, что способствует нейтрализации воды. Поэтому цель работы состояла в изучении процессов умягчения воды на анионитах при выделении хлоридов и сульфатов.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- изучить процессы ионообменного извлечения из воды хлоридов и сульфатов на анионитах в OH^- и CO_3^{2-} -формах;
- исследовать процессы умягчения воды при её ионообменной деминерализации на анионитах в основной форме;
- определить влияние солевого состава воды на процессы умягчения и деминерализации с использованием анионообменных смол.

Описание исследования

Процессы сорбции анионов из кислых растворов на анионитах в основной форме изучены хорошо [4,5]. Сорбция анионов из нейтральных растворов на анионитах в основной или карбонатной форме изучена мало.

Поэтому в начале были исследованы процессы сорбции хлоридов и сульфатов на анионите АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -формах из растворов хлорида натрия и сульфата натрия в дистиллированной воде.

Хлориды выделяли из раствора хлорида натрия в дистиллированной воде с концентрацией 1,00, 2,00 г/дм^3 по хлоридам.

Результаты сорбций хлоридов на анионите АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -формах приведены в таблице 1 на рис. 1, 2. Как видно на рис. 1 емкость ионита растет при снижении концентрации хлоридов в исходном растворе. pH при сорбции хлоридов на анионите в OH^- -форме поднимается до 10,0–12,5 (кривые 3, 4).

Обычно ёмкость ионита растёт с повышением концентрации ионов в растворе.

Однако при более высокой концентрации хлоридов в процессе их сорбции на анионите значительно возрастает концентрация гидрооксид-анионов в очищенной воде. Если судить по кривой 1 (рис. 1), то на начальном этапе концентрация хлоридов снижается на ~51 мг-экв/дм^3. В раствор переходит эквивалентное количество гидрооксид-анионов.

При этом щёлочность раствора достигает 31 мг-экв/дм^3, что соответствует 2 %-му раствору NaOH.

Такой раствор можно использовать для регенерации анионита (обычно используют 4 %-й раствор щёлочи).

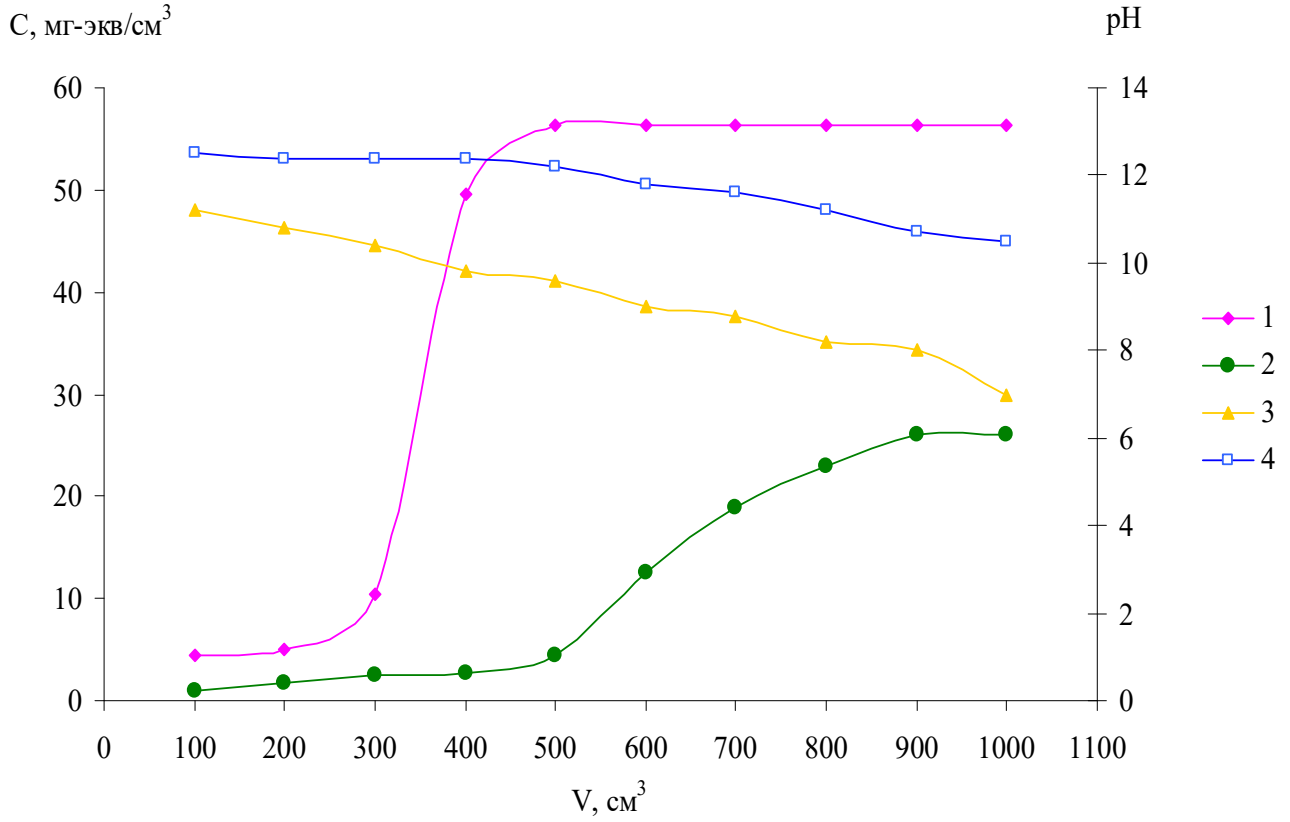
Очевидно, что в данном случае ёмкость анионита зависит как от исходной концентрации хлоридов в растворе, так и от щёлочности раствора, образовавшегося при сорбции хлоридов. При концентрации хлоридов ~1000 мг/дм^3 максимальная щелочность воды, обработанной на анионите, не превышает 28 мг-экв/дм^3 (1,13 %). В этом случае сорбция протекает более эффективно, по сравнению с предыдущим случаем.

Следует отметить, что при снижении скорости фильтрования (таблица 1) ёмкость анионита АВ-17-8 в OH^- -форме растёт. При скорости фильтрования 2,12 м/ч при фильтровании через анионит объёмом 20 см^3 ПОДЕ составляет 850,75 мг-экв/дм^3.

Как видно из таблицы 1 при обработке 500 см^3 раствора на 20 см^3 ионита содержание хлоридов снижается до 35–88 мг/дм^3. В шестой пробе содержание хлоридов достигает 319 мг/дм^3.

Таблица 1. *Зависимость остаточного содержания хлоридов, щелочности и pH от пропущенного объема воды через анионит АВ-17-8 (V_i=20 см^3) в OH^- -форме ([Cl^-]=1,00 г/дм^3) (скорость фильтрования 2,12 м/ч)*

V, см^3	pH	Щелочность, мг-экв/дм^3	[Cl^-]		$M_{сорб.}$ Cl^-, мг
			мг/дм^3	мг-экв/дм^3	
нач.	7,8	3,0	1063,50	30,0	-
100	11,3	25,0	35,45	1.0	102,80
200	11,4	27,4	56,72	1,6	100,67
300	11,7	28,0	70,90	2,0	99,26
400	11,8	28,0	88,62	2,5	97,48
500	11,8	22,0	88,62	2,5	97,48
600	11,3	19,0	319,05	9,0	74,44
700	10,2	4,0	886,25	25,0	17,72
800	9,3	2,0	974,87	27,5	8,86
900	9,0	1,6	1019,18	28,7	4,43
1000	8,8	1,6	1063,50	30,0	0,00



$ПОДЕ_1$=786 мг-экв/дм^3; $ПОДЕ_2$=815 мг-экв/дм^3

Рис. 1. Зависимость концентрации хлоридов (1,2) и pH (3,4) от пропущенного объема раствора NaCl через анионит АВ-17-8 в OH^- -форме (V_i=20 см^3) при [Cl^-]=2,00 г/дм^3 (1,4), при [Cl^-]=1,00 г/дм^3 (2,3) (скорость фильтрования 3,18 м/ч)

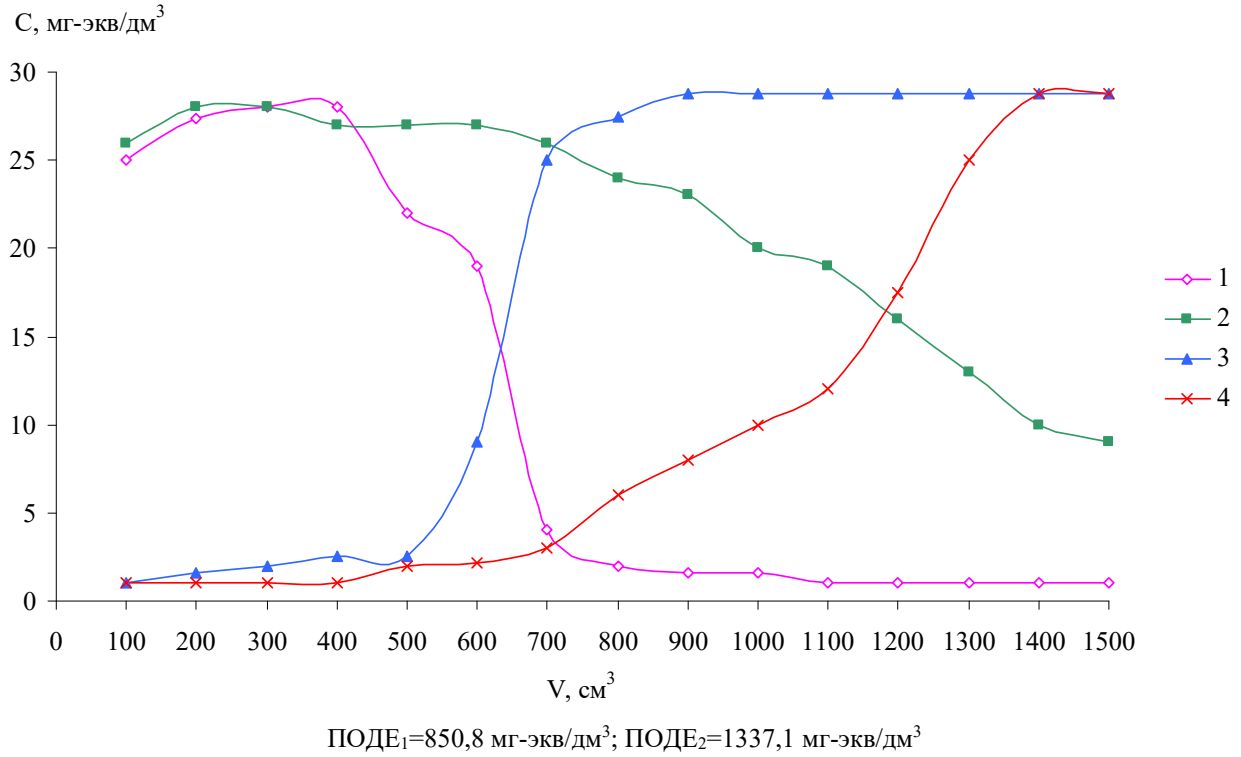


Рис. 2. Зависимость остаточных значений щелочности (1,2) и концентрации хлоридов (3,4) от пропущенного объема раствора NaCl ($[Cl^-]$=1000 мг/дм^3) через анионит АВ-17-8 (V_i=20 см^3) в OH^- (1,3) и CO_3^{2-} –форме (2,4) (скорость фильтрования 3,18 м/ч)

В целом в 600 см^3 раствора остаточная средняя концентрация хлоридов достигает 110 мг/дм^3. Такая концентрация хлоридов вполне допустима для водооборотных систем.

Следует отметить, что в первых шести пробах pH раствора превышает 11. При концентрации хлоридов 2000 мг/дм^3 pH раствора достигает 12,5. В первых 800 см^3, из обработанных 1000 см^3 раствора, pH превышает 11. Это объясняется более высокой концентрацией гидрооксид-анионов в растворе при пропускании воды с исходной концентрацией хлоридов 2 г/дм^3, по сравнению с исходной концентрацией хлоридов 1 г/дм^3.

В процессах очистки воды от хлоридов ионит можно использовать не только в OH^- -форме, но и в CO_3^{2-} -форме. Как видно на рис. 2 при использовании анионита АВ-17-8 в CO_3^{2-} (карбонатной) -форме ёмкость ионита по хлорид анионам возрастает почти в 1,6 раза. При очистке 1000 см^3 воды на 20 см^3 ионита получен раствор с остаточным содержанием хлоридов 125 мг/дм^3. При этом реакция среды pH достигает ~11. Щелочность достигает 25,8 мг-экв/дм^3. Очевидно, что в растворе с такими параметрами ионы магния будут довольно легко гидролизоваться с образованием нерастворимого гидрооксида магния, а в присутствии карбонат ионов легко будут осаждаться ионы кальция в виде нерастворимого карбоната кальция.

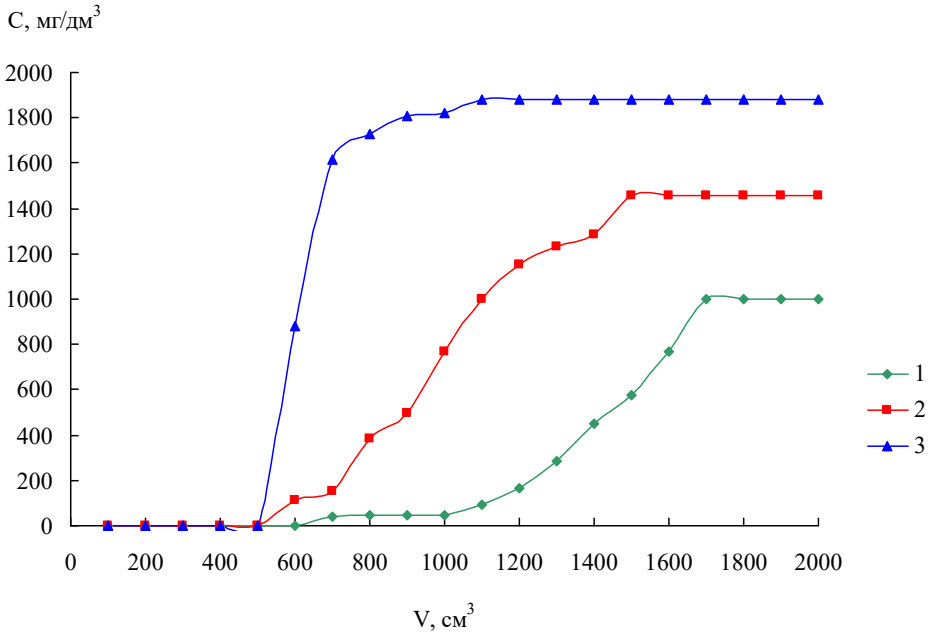
В целом, более высокую ёмкость анионита АВ-17-8 в карбонатной форме по сравнению с основной формой можно объяснить тем, что в ряду анионов Cl^-, OH^- и CO_3^{2-} ионит имеет наименьшую селективность по карбонат анионам. Поэтому обратный процесс в реакции обмена будет протекать в меньшей степени, чем в реакции (2).

Как видно из рис. 2 анионит АВ-17-8 обеспечивает достаточно высокую эффективность при выделении хлоридов. Полная обменная динамическая емкость по хлоридам анионита в OH^- -форме достигает 850 мг-экв/дм^3.

При сорбции хлоридов из кислых растворов, согласно литературным данным, его емкость составляет 800–900 мг-экв/дм^3 [6]. Таким образом, можно сделать вывод, что эффективность выделения хлоридов достаточно высокая. Емкость ионита в CO_3^{2-} -форме ещё выше и составляет 1337 мг-экв/дм^3. Как уже упоминалось селективность ионита по карбонат анионам ниже, чем по гидрооксид анионам и по хлоридам, что приводит к увеличению емкости ионита. Недостатком процесса является то, что остаточные концентрации хлоридов даже в первых пробах достигают

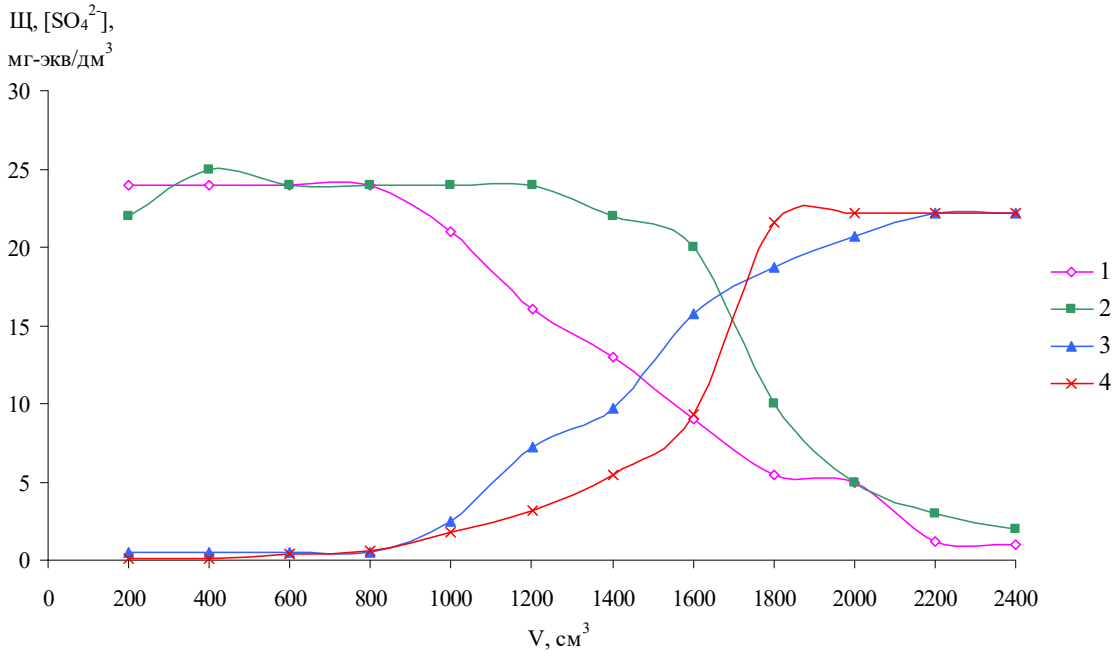
35–56 мг/дм^3. Однако, если учесть, что исходная концентрация хлоридов составляла 1000 мг/дм^3, то результаты в целом можно считать положительными.

Сульфаты выделяли из раствора Na_2SO_4 в дистиллированной воде. При проведении сорбции через ионит АВ-17-8 в OH^- -форме объемом 20 см^3 пропускали растворы с концентрациями 1,0; 1,5 и 2,0 г/см^3 по сульфатам. Результаты эксперимента приведены на рис. 3, 4.



ПОДЕ$_1$=1402 мг-экв/дм^3; ПОДЕ$_2$=1512 мг-экв/дм^3; ПОДЕ$_3$= 1238 мг-экв/дм^3

Рис. 3. Выходные кривые адсорбции сульфатов на аниоците АВ-17-8 (V_i=20 см^3) в OH^- -форме (скорость фильтрования 3,18 м/ч): 1 – [SO_4^{2-}]=1 г/дм^3; 2 – [SO_4^{2-}]=1,5 г/дм^3; 3 – [SO_4^{2-}]=2 г/дм^3



ПОДЕ$_1$=1448 мг-экв/дм^3 ПОДЕ$_2$=1513 мг-экв/дм^3

Рис. 4. Зависимость щелочности (1,2), остаточной концентрации сульфатов (3,4) от объема пропущенного раствора Na_2SO_4 ([SO_4^{2-}]=1000 мг/дм^3) через анионит АВ-17-8 в OH^- (1,3) и CO_3^{2-} -форме (2,4) (V_i=20 см^3)

Как видно из рис. 3, емкость ионита возрастает с повышением исходной концентрации сульфатов от 1,0 г/дм^3 до концентрации сульфатов 1,5 г/дм^3. В целом, емкость ионита в OH^- -форме по сульфатам в ~1,8 раза выше по сравнению с емкостью по хлоридам, что обусловлено более высокой селективностью ионита по двухзарядным анионам по сравнению с однозарядными.

При концентрации сульфатов 2,0 г/дм^3 емкость ионита по сульфатам падает, что связано с подщелачиванием воды при сорбции сульфатов на анионите в основной форме. В этом случае щелочность обработанной воды достигает 42,0 мг-экв/дм^3 (~1,7 %), что ограничивает емкость ионита по сульфатам на уровне ~1200,0 мг-экв/дм^3.

В целом, обменная емкость анионита АВ-17-8 достаточно высокая при использовании его как в основной, так и карбонатной форме. Обменная емкость ионита в OH^- -форме достигла 1448 мг-экв/дм^3 при исходной концентрации сульфатов 1 г/дм^3, а в CO_3^{2-} -форме – 1513 мг-экв/дм^3, что обусловлено большей селективностью ионита по сульфат ионам. Карбонаты по селективности уступают как сульфатам, так и гидрооксид анионам. При этом селективность ионита по сульфатам настолько выше селективности анионов OH^- и CO_3^{2-}, что в процессе ионного обмена практически нивелируется разница в селективности анионита по гидрооксид анионам и карбонат анионам. Поэтому емкость ионита по сульфатам в OH^- -форме мало отличается от его емкости в CO_3^{2-} -форме. Необходимо также отметить, что емкость анионита АВ-17-8 в основной форме по сульфатам является достаточно высокой ~1500 мг-экв/м^3, что обеспечит его значительную эффективность при деминерализации воды.

Обычно при ионообменной деминерализации воды на первой стадии используют катионит в кислой форме – для выделения катионов, а на второй стадии на анионите в основной форме связываются образовавшиеся в воде кислоты [4,5]:

$$m \cdot nKt^- H^+ + M_m X_n \rightleftarrows m\{[Kt^-]_n M^{m+}\} + nH_m X$$

$$nH_m X + m \cdot nAn^+ OH^- \rightleftarrows n\{[An^+]_m X^{m-}\} + n \cdot mH_2O$$

где Kt^- – функциональная группа катионита;

An^+ – функциональная группа анионита;

M – металл;

n – заряд катиона металла;

X – анион;

m – заряд аниона.

В данной работе использовали аниониты в основной (OH^- или CO_3^{2-}) форме.

В случае использования высокоосновного анионита АВ-17-8 на первой стадии происходит связывание хлорид- и сульфат-анионов с одновременным подщелачиванием среды. При наличии в воде солей жесткости происходит её умягчение.

Подобные процессы протекают и при использовании анионита в карбонатной форме:

$$[An^+]_2CO_3^{2-} + 2Cl^- \rightleftarrows 2An^+Cl^- + CO_3^{2-}$$

$$[An^+]_2CO_3^{2-} + SO_4^{2-} \rightleftarrows [An^+]_2 SO_4^{2-} + CO_3^{2-}$$

$$H_2O + CO_3^{2-} \rightleftarrows HCO_3^- + OH^-$$

Использование данного подхода к деминерализации жесткой воды позволяет существенно сократить расходы реагентов на умягчение воды и объемы отработанных регенерационных растворов.

При реализации двухступенчатого ионообменного процесса с использованием катионита на первой стадии и анионита на второй возникает необходимость в регенерации катионита кислотой и анионита щелочью. В случае использования реагентного умягчения возникает необходимость применения основного реагента для снижения концентрации ионов жесткости. При этом анионы остаются в воде. Использование анионитов в основной форме позволяет одновременно решать задачу очистки воды от сульфатов и хлоридов, а также умягчения воды.

При проведении исследований использовали модельные растворы с содержанием хлоридов 300,0–1500,0 мг/дм^3; сульфатов 300,0–1000,0 мг/дм^3, жесткостью – 7,5–8,1 мг-экв/дм^3, щелочность 4,6–7,9 мг-экв/дм^3.

Результаты, полученные при выделении из модельного раствора хлоридов на анионите в OH^- -форме, приведены на рис. 5.

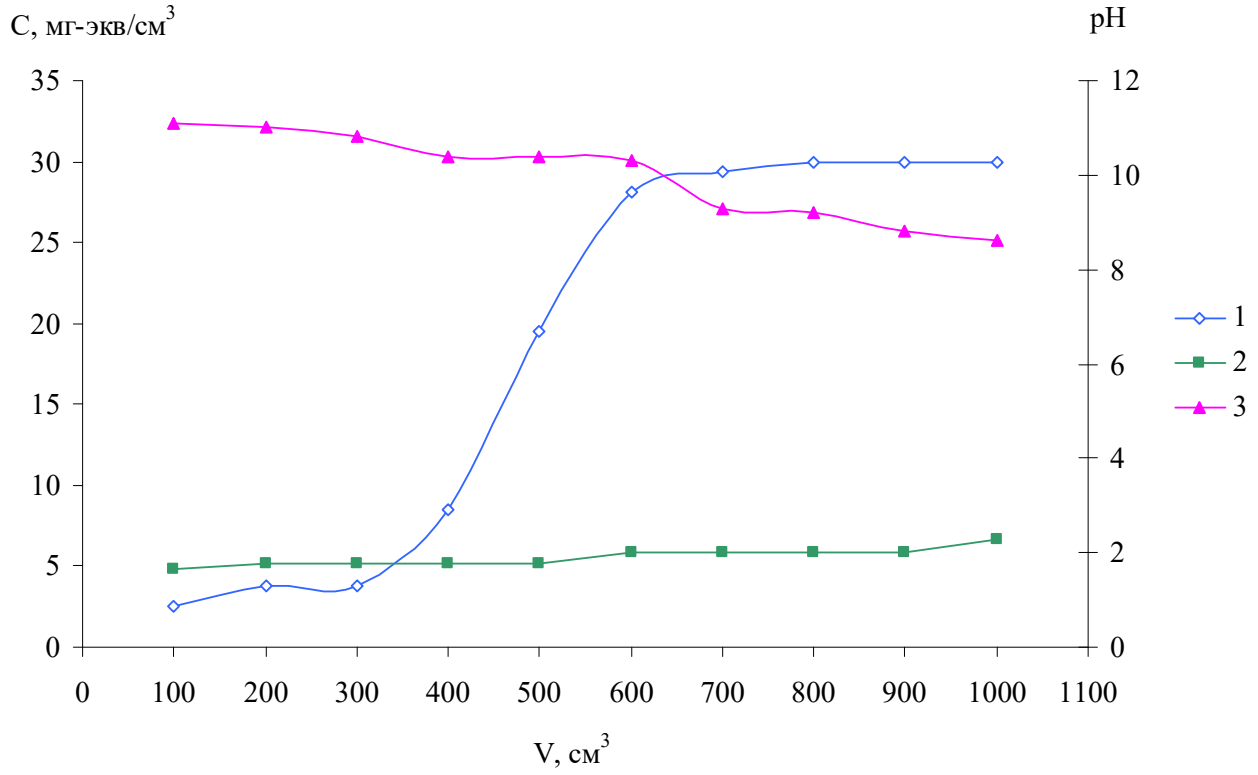


Рис. 5. Зависимость концентрации хлоридов (1), жесткости (2) и pH (3) модельного раствора (Ж=7,9 мг-экв/дм^3; [Ca^{2+}]=5,5 мг-экв/дм^3; [Mg^{2+}]=2,4 мг-экв/дм^3; [Cl^-]=1063,50 мг/дм^3; Щ=4,7 мг-экв/дм^3) от пропущенного объема через анионит АВ-17-8 в OH^- -форме (V_i=20 см^3) (время отстаивания – 3 ч)

Как видно из рис. 5 концентрация хлоридов в воде снижается до 100 мг/дм^3, а жесткость снижается до 5,2–6,6 мг-экв/дм^3. При этом более эффективно снижается жесткость в первых пробах, в которых отмечено повышение pH до 10,5–11,1. В целом, эффективность умягчения воды невысокая (~40 %), что обусловлено относительно невысокой концентрацией гидрокарбонат-анионов в растворе.

В данном случае, снижение жесткости происходит за счет гидролиза ионов магния. Ионы кальция почти полностью остаются в растворенном состоянии. На более эффективное умягчение воды можно рассчитывать при использовании ионита в CO_3^{2-} -форме, так как при сорбции хлоридов в раствор переходят карбонат-анионы, которые эффективно связывают ионы Ca^{2+} в воде. Данные по использованию анионита в карбонатной форме приведены на рис. 6.

В целом, анионит в карбонатной форме обеспечивает снижение концентрации хлоридов до 265,0–440,0 мг/дм^3, что несколько хуже, чем анионит в OH^- -форме. Однако, при этом отмечено снижение жесткости до 3,0 мг-экв/дм^3, что существенно ниже, чем в предыдущем случае.

Следует отметить, что использование анионита в CO_3^{2-} -форме обеспечивает меньшее повышение pH по сравнению с OH^- -формой. В данном случае как видно из рис. 6 pH в первых пробах не превышает 10,8, что недостаточно для полного гидролиза магния.

Как видно из рис. 7 при использовании ионита в OH^- -форме жесткость воды, содержащей 674 мг/дм^3 хлоридов, снижается с 7,5 до 0,25 мг-экв/дм^3 при остаточном содержании хлоридов 10 мг/дм^3. Даже при исчерпании емкости ионита на 80–90 % остаточная жесткость достигает 0,5–2,5 мг-экв/дм^3.

При использовании анионита в CO_3^{2-} -форме жесткость воды снижается с 7,5 до 0,25–1,1 мг-экв/дм^3, содержание хлоридов с 700 до 132 мг/дм^3. В данных опытах достаточно высокой остается щелочность воды. Однако при использовании воды в водоциркуляционных системах она будет снижаться при сорбции углекислоты из атмосферы. С другой стороны при высокой щелочности эффективно связывается свободная углекислота, что препятствует углекислотной коррозии. В данном случае необходимо отметить высокую эффективность очистки воды от ионов кальция.

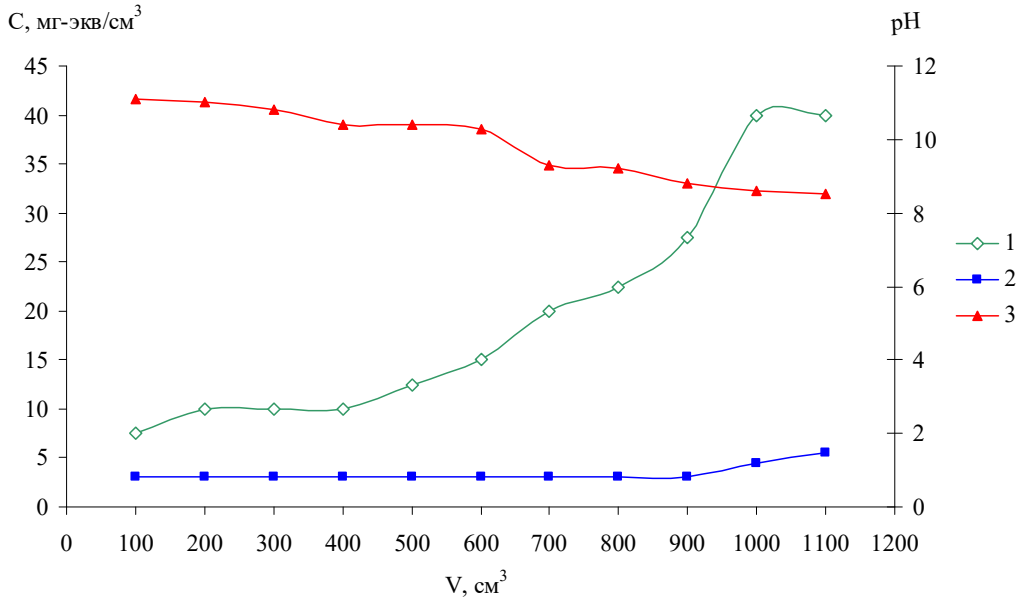


Рис. 6. Зависимость концентрации хлоридов (1), жесткости (2) и pH (3) модельного раствора (Ж=7,8 мг-экв/дм^3; [Ca^{2+}]=5,4 мг-экв/дм^3; [Mg^{2+}]=2,4 мг-экв/дм^3; [Cl^-]=1418 мг/дм^3; Щ=4,7 мг-экв/дм^3) от пропущенного объема раствора NaCl ([Cl^-]=1,4 г/дм^3) через анионит АВ-17-8 в CO_3^{2-} -форме (V_i=20 см^3)

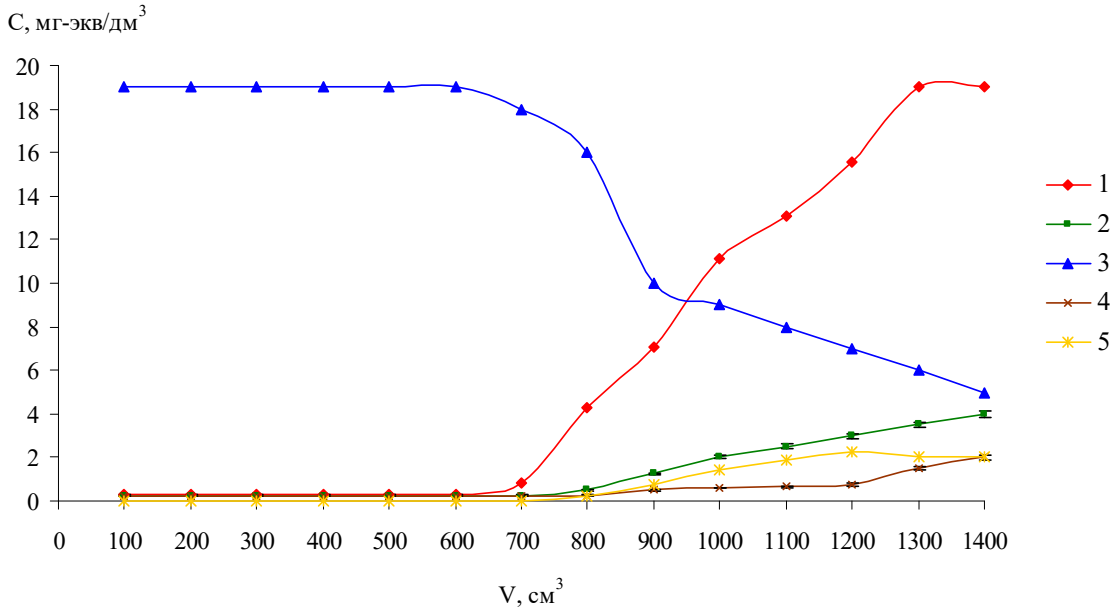


Рис. 7. Зависимость остаточной концентрации хлоридов (1), жесткости (2), щелочности (3), содержания ионов кальция (4) и магния (5) от объема пропущенного через анионит АВ-17-8 в OH^- -форме (V_i=20 см^3) модельного раствора (Ж=7,5 мг-экв/дм^3; Щ=5,2 мг-экв/дм^3; [Ca^{2+}]=5,5 мг-экв/дм^3; [Mg^{2+}]=2,0 мг-экв/дм^3; [Cl^-]=674 мг/дм^3)

При очистке 1800 см^3 воды на 20 см^3 ионита в карбонатной форме степень очистки воды от ионов кальция превышала 90 %, а остаточное содержания Ca^{2+} не превышало 0,5 мг-экв/дм^3 (рис. 8). И хотя эффективность очистки от хлоридов была ниже, чем в случае использования ионита в OH^- -форме (степень очистки в первых 1100 см^3 достигала 81,2 %, а потом снижалась до 30 % – при очистке 1800 см^3 и до 10 % – при очистке 2000 см^3 раствора), умягчение воды за счёт связывания кальция в виде карбоната было очень эффективным. При умягчении 2000 см^3 раствора на 20 см^3 анионита в CO_3^{2-} -форме степень умягчения достигала 67–93 %, при этом остаточное pH воды составило 8,35–9,65, что явилось причиной недостаточно эффективного удаления ионов магния. Это в целом мало влияет на эффективность стабилизационной обработки воды, так как обычно содержание ионов Mg^{2+} в природной

воде в 2–4 раза меньше, чем Ca^{2+}, и магний в отличие от кальция не образует ни карбонатных ни сульфатных отложений на поверхности теплообмена.

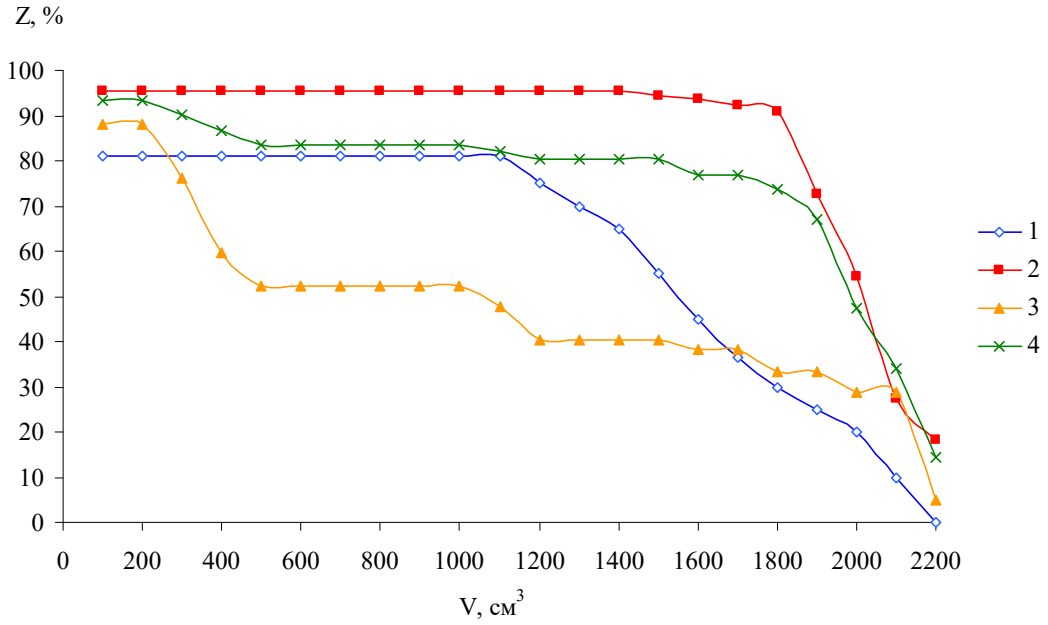


Рис. 8. Зависимость степени очистки от хлоридов (1), ионов кальция (2), магния (3) и степени умягчения (4) от объема пропущенного через анионит АВ-17-8 в CO_3^{2-} -форме (V_i=20 см^3) раствора (Ж=7,5 мг-экв/дм^3; Щ=5,2 мг-экв/дм^3; [Ca^{2+}]=5,5 мг-экв/дм^3; [Mg^{2+}]=2,0 мг-экв/дм^3; [Cl^-]=674 мг/дм^3)

Исследование процессов умягчения воды при сорбции сульфатов на аниоките АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -форме (V_i=20 см^3) проводили используя модельный раствор Na_2SO_4 в водопроводной воде ([SO_4^{2-}]=700 мг/дм^3). Результаты эксперимента приведены на рис. 9, 10.

При наличии в воде сульфатов лучшие результаты получены при использовании ионита в CO_3^{2-} -форме по сравнению с OH^- -формой. В случае использования анионита в CO_3^{2-} -форме на 20 см^3 удалось умягчить 1400 см^3 при снижении жесткости до 1,9 мг-экв/дм^3, при остаточной концентрации сульфатов 39 мг/дм^3, тогда как для анионита в OH^--форме при том же объеме ионита при снижении жесткости до 1,9 мг-экв/дм^3 объем очищенной воды составил всего 600 см^3 при остаточном содержании сульфатов 167 мг/дм^3.

В обоих случаях емкость ионита по сульфатам была достаточно высокой и достигала 1300 мг-экв/дм^3. Большая эффективность ионита в карбонатной форме объясняется тем, что при переходе карбонатов из воды они лучше связывают ионы кальция, чем гидрооксид анионы. Однако, при использовании ионита в OH^- -форме вследствие высоких значений pH происходит полный гидролиз ионов магния, что приводит к удалению магния из воды.

Одновременная сорбция хлоридов и сульфатов на ионите АВ-17-8 была исследована при пропускании через анионит в OH^- и CO_3^{2-} -форме шахтной воды, имеющей следующие характеристики: Ж=15 мг-экв/дм^3; [Ca^{2+}]=5,5 мг-экв/дм^3; [Mg^{2+}]=9,5 мг-экв/дм^3; Щ=16 мг-экв/дм^3; [Cl^-] =340–360 мг/дм^3; [SO_4^{2-}] =750–800 мг/дм^3. Раствор пропускали через 50 см^3 анионита АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -форме, отбирали пробы по 400 см^3 и определяли остаточное количество хлоридов, сульфатов, щелочность, жесткость, содержание ионов кальция, магния, pH. Результаты эксперимента приведены в таблицах 2, 3.

При очистке шахтной воды содержащей хлориды, сульфаты и ионы жесткости лучшие результаты получены при использовании ионита в OH^- -форме по сравнению с CO_3^{2-} формой.

При использовании ионита в объеме 50 см^3 в первом случае удалось снизить жесткость в 1200 см^3 воды до 0,2 мг-экв/дм^3 при снижении концентрации сульфатов до 6 мг/дм^3, хлоридов – до 135 мг/дм^3. Емкость ионита по хлоридам достигла 145 мг-экв/дм^3, сульфатам – 765 мг-экв/дм^3, суммарная по хлоридам и сульфатам – 910 мг-экв/дм^3.

В данном случае на результаты выделения хлоридов и сульфатов существенное влияние оказывает значительная концентрация карбонат-анионов в шахтной воде – 16 мг-экв/дм^3.

Начальная концентрация сульфатов в воде составляла 16,7 мг-экв/дм^3, хлоридов – 9,58 мг-экв/дм^3. Вследствие этого в щелочном растворе

карбонаты вполне могут конкурировать с сульфатами и хлоридами при сорбции на аниоците.

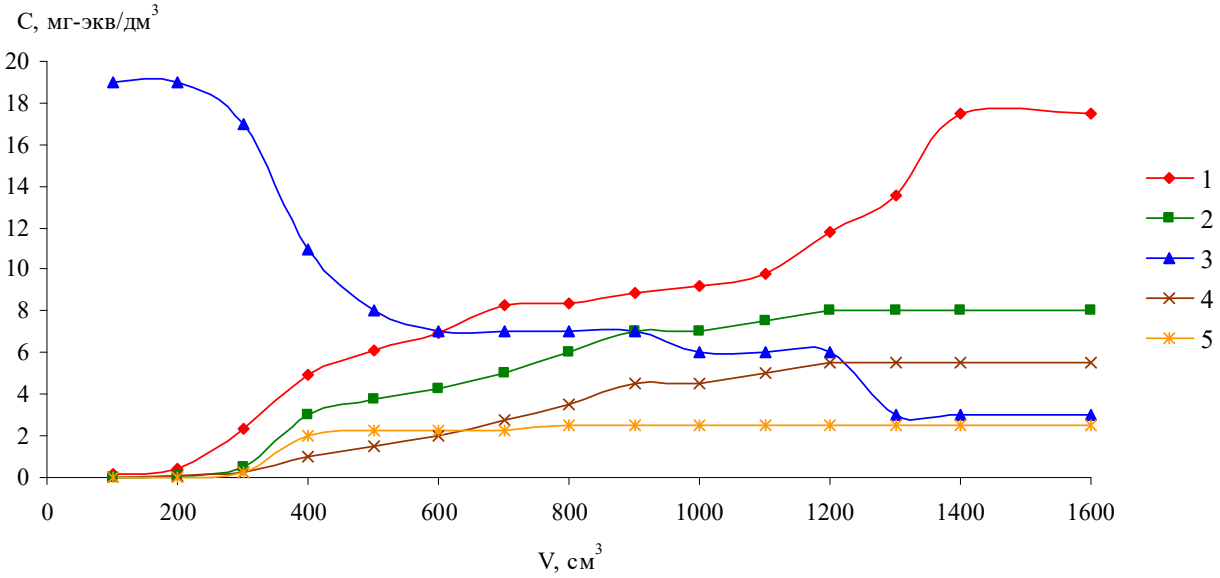


Рис. 9. Зависимость остаточного содержания сульфатов (1), жесткости (2), щелочности (3), концентрации ионов кальция (4) и магния (5) от объема пропущенного раствора Na_2SO_4 в водопроводной воде ($[SO_4^{2-}]$=839 мг/дм^3) через анионит АВ-17-8 в OH^- -форме (V_i=20 см^3)

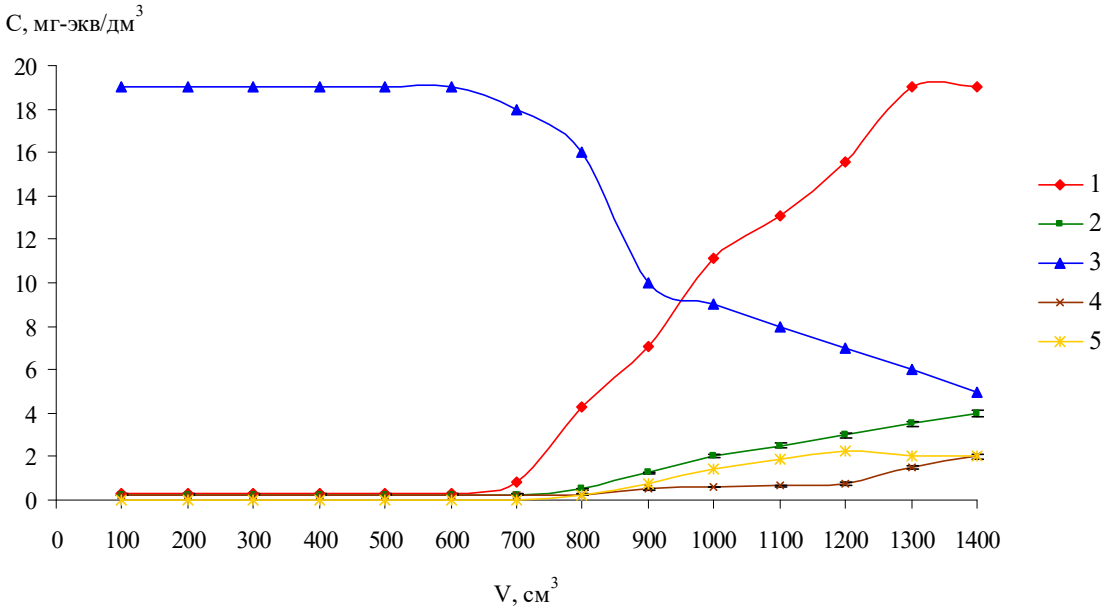


Рис. 10. Зависимость концентрации сульфатов (1), жесткости (2), щелочности (3), содержания ионов кальция (4) и магния (5) от объема пропущенного раствора Na_2SO_4 в водопроводной воде ($[SO_4^{2-}]$=807 мг/дм^3) через анионит АВ-17-8 в CO_3^{2-} -форме

Таблица 2. *Зависимость остаточного содержания сульфатов, хлоридов, щелочности, pH, жесткости, ионов кальция и магния от пропущенного объема раствора через анионит АВ-17-8 в OH^- -форме (V_i=50 см^3)*

V, см^3	Щелочность, мг-экв/дм^3	pH	Жесткость, мг-экв/дм^3	$[Ca^{2+}]$, мг-экв/дм^3	$[Mg^{2+}]$, мг-экв/дм^3	$[Cl^-]$, мг/дм^3	$[SO_4^{2-}]$, мг/дм^3
нач.	16	7,50	15,00	5,50	9,50	354,50	755,90
400	35	12,16	0,10	0,10	0,00	132,93	0,00
800	38	12,35	0,10	0,10	0,00	132,93	0,00
1200	33	11,35	5,05	0,30	4,75	155,10	18,18
1600	30	10,30	10,00	0,75	9,25	354,50	109,77
2000	29	10,04	10,00	0,75	9,25	354,50	192,63

2400	24	9,73	10,00	0,75	9,25	354,50	309,02
2800	19	9,35	10,00	0,75	9,25	354,50	433,66
3200	17	8,94	10,62	1,25	9,37	354,50	547,92
3600	16	8,71	11,25	2,25	9,00	354,50	637,39
4000	16	8,47	12,87	4,00	9,00	354,50	720,96
4400	16	8,00	14,50	5,50	9,00	354,50	755,90

OE_{Cl^-} =145 мг-экв/дм^3; $OE_{SO_4^{2-}}$ =765 мг-экв/дм^3; $OE_{\sum SO_4^{2-},Cl^-}$ =910 мг-экв/дм^3

Таблица 3. *Зависимость остаточного содержания сульфатов, хлоридов, щелочности, pH, жесткости, ионов кальция и магния от пропущенного объема раствора через анионит АВ-17-8 в CO_3^{2-} -форме (V_i=50 см^3)*

V, см^3	Щелочность, мг-экв/дм^3	pH	Жесткость, мг-экв/дм^3	[Ca^{2+}], мг-экв/дм^3	[Mg^{2+}], мг-экв/дм^3	[Cl^-], мг/дм^3	[SO_4^{2-}], мг/дм^3
нач	16	7,50	15,0	5,50	9,50	354,50	755,90
400	49	10,47	7,0	0,25	6,75	88,63	0,00
800	60	10,66	7,5	0,25	7,25	132,94	0,00
1200	46	10,30	8,5	0,25	8,25	132,94	55,71
1600	44	10,12	8,5	0,25	8,25	132,94	58,55
2000	38	9,83	8,5	0,75	7,75	177,25	94,43
2400	24	9,38	9,0	2,50	6,50	354,50	302,17
2800	22	8,92	10,0	4,00	6,00	354,50	467,89
3200	20	8,75	12,0	5,00	7,00	354,50	661,00
3600	18	8,64	12,5	5,50	7,00	354,50	672,33
4000	18	8,60	12,5	5,50	7,00	354,50	695,00
4400	16	8,60	12,5	5,50	7,00	354,50	749,29
4800	16	8,59	12,5	5,50	7,00	354,50	749,76
5200	16	8,57	12,5	5,50	7,00	354,50	755,43
5600	16	8,81	12,5	5,50	7,00	354,50	769,59

OE_{Cl^-} =251 мг-экв/дм^3; $OE_{SO_4^{2-}}$ =791 мг-экв/дм^3; $OE_{\sum SO_4^{2-},Cl^-}$ =1042 мг-экв/дм^3

Кроме того, высокие концентрации карбонатов способствуют осаждению ионов кальция. Поэтому, не смотря на высокую общую жесткость, содержание Ca^{2+} в обработанном растворе было достаточно низким (0,75 мг-экв/дм^3) до пропущенного объема в 3600 см^3.

В данном случае именно кальций является причиной осадкоотложений, так как при pH меньше 11 при нагревании в основном осаждается карбонат кальция ($CaCO_3$). Поэтому вода даже при общей жесткости 10 мг-экв/дм^3 при содержании ионов кальция – 0,75 мг-экв/дм^3 является весьма термостабильной.

Остаточная жесткость в воде, в данных опытах обусловлена присутствием Mg^{2+}, который при pH менее 11 не осаждается даже при высоком содержании карбонат-анионов. Следует отметить, что умягчение шахтной воды на анионите в карбонатной форме происходило несколько хуже, что обусловлено высокой концентрацией ионов Mg^{2+}, карбонат ионов и относительно низкими значениями pH. Однако, суммарная емкость по хлоридам и сульфатам была несколько выше, чем для ионита в OH^- -форме и достигала 1042 мг-экв/дм^3.

Заключение

1. Изучены процессы сорбции хлорид- и сульфат-анионов на анионите АВ-17-8 в OH^- и CO_3^{2-} -формах. Показано, что емкость ионита выше в CO_3^{2-} -форме как по хлоридам, так и по сульфатам, емкость по сульфатам в ,2–1,5 раза выше, чем по хлоридам.
2. Установлено, что при сорбции хлоридов и сульфатов на анионите АВ-17-8 в основной форме, происходит увеличение щелочности воды, что в присутствии ионов жесткости обеспечивает её эффективное умягчение. В случае водопроводной воды лучшие результаты получены при использовании ионита в CO_3^{2-} -форме, в случае шахтной воды – при использовании ионита в OH^- -форме.
3. Данная технология может быть весьма перспективна при подготовке воды для водооборотных систем охлаждения в промышленности, энергетике, в коммунальных хозяйствах. Зачастую в системах охлаждения предприятий используют воду с недопустимо высокими значениями жесткости воды и минерализации, обусловленной в основном высокими концентрациями сульфа-

тов и хлоридов. Это приводит к необоснованно высоким значениям сброса воды на продувку систем, а также к интенсивному загрязнению природных водоёмов. Однако, при умягчении воды, при снижении содержания в ней хлоридов и сульфатов на предприятиях можно использовать бессточные (замкнутые) водоциркуляционные системы. При этом решается целый комплекс проблем – увеличение ресурса, надёжности и эффективности работы теплообменников и другого оборудования, рациональное использование водных ресурсов и защита природных водоёмов от загрязнения минерализованными стоками.

Список литературы

1. Keizer K. // Membrane Separation Technology, Principles and Application / K. Keizer, J.R. Uhlholm, T.J .Burggraaf // Amsterdam: Elsevier. – 1995. – pp. 157–199.
2. Когановский А.М. Адсорбция и ионный обмен в процессах водоподготовки и очистки сточных вод. – К.: Наукова думка, 1983. – 239 с.
3. Гончарук В.В. Экологические аспекты современных технологий охраны водной среды / Гончарук В. В. – К. : Наук. думка, 2005. – 399 с.
4. Мамченко А.В. Обессаливание воды ионитами / А.В. Мамченко, Т.И. Якимова, В.Г. Кривдик и др. // Химия и технология воды. – 1989 – Т. 11, № 11. – С. 990–1011.
5. Джалилов М.Ф. Малоотходная технологическая схема обессаливания воды / М.Ф. Джалилов, А.М. Кулиев, Э.А. Сафиев и др.// Химия и технология воды. – 1992. – Т. 14, № 2. – С. 140–147.
6. Гомеля М.Д. Очисні споруди. Основи проектування : навч, посіб. / М.Д. Гомеля, Т.В. Крисенко, У.М. Дейкун. – К. : НТУУ «КПІ», 2007. – 176 с.

References

1. Keizer K., Uhlholm J.R., Burggraaf T.J. Membrane Separation Technology, Principles and Application. Amsterdam: Elsevier, 1995, pp. 157–199.
2. Koganovskij A.M. Adsorbciya i ionnyj obmen v processah vodopod-gotovki i ochistki stochnyh vod. [Adsorption and ion exchange in the processes of water treatment and wastewater treatment]. Kiev: Naukova dumka, 1983, 239 p.
3. Goncharuk V.V. Ekologicheskie aspekty sovremennyh tekhnologij ohrany vodnoj sredy [Ecological aspects of modern technologies for the protection of the aquatic environment]. Kiev: Naukova dumka,, 2005, 399 p.
4. Mamchenko A.V., YAkimova T.I., Krivdik V.G. et al. Desalination of water with ion exchangers. Himiya i tekhnologiya vody, 1989, Vol. 11, No 11, pp. 990–1011.
5. Dzhalilov M.F., Kuliev A.M., Safiev E.A. et al. Low-waste technological scheme of water desalination. Himiya i tekhnologiya vody, 1992, Vol. 14, No 2, pp. 140–147.
6. Gomelya M.D., Krisenko T.V., Dejkun U.M. Treatment facilities. Design basics. Kiev: National Technical University of Ukraine «KPI», 2007. 176 p.

ISSN 2413-5526

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 6 № 1

SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 6 No 1

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

Адрес редколлегии:
ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru
тел. +7(8692) 71-01-64.

Редакция не несет ответственности за нарушение авторами исключительных прав на результаты интеллектуальной деятельности третьих лиц. Мнения, высказываемые авторами в публикуемых статьях, не всегда совпадают с мнением редакции. При перепечатке материалов ссылка на научный журнал «Энергетические установки и технологии» обязательна.

Научный журнал «Энергетические установки и технологии» издается в авторской редакции.

Компьютерная верстка: *Е.А. Нестерова.*

Подписано к печати 27.03.2020. Изд. № 22/20. Зак. 13/20. Тираж 65 экз.
Объем 23 п.л. Усл. печ. л. 21,39. Уч.-изд. л. 22,54. Формат бумаги 60 х 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»