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. 5 № 4

Севастополь
2019

Э 651 ISSN 2413-5526
УДК 621.311

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2019. – Т. 5. - № 4. – 172 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», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки **7**

Браславский Ю.В., Матузаев К.Б., Мерзликин Г.Я., Сукрушев А.В. Оценка безопасности ЯЭУ с ВВЭР-1000 при непредусмотренном открытии паросбросных устройств второго контура 7

Ермакова Д.Г., Лысюк А.П., Фролова М.А., Безотосный С.С. Система регулирования экономичности сжигания топлива в топке парового котла 13

Журавлев А.А., Пухлий В.А., Лепеха О. Г., Пантель О. В., Корнеева Н. К., Глушкова Е. В. К задаче термоупругости конструкционных элементов атомной энергетики в виде трапециевидных пластин 22

Качур С.А., Бутович Э.В., Зозулин А.А Определение влияния стержней регулирования на форму энерговыделения активной зоны реактора на основе статистических методов 31

Кулюткина Т.Ф., Мирошниченко Е.В., Матузаева О.В. Установка с вертикальным реактором для выращивания наногетероэпитаксиальных структур из жидкой фазы 38

Мороз Н.А., Андреева Е.В., Чупрынин С.А., Замыслова Т.Н., Костов М.А. Обзор существующих и перспективных способов извлечения радиоактивных отходов, размещающихся в хранилищах «навалом», и опыт использования установок извлечения на ядерных объектах 42

Пухлий В.А., Пухлий К.В. Термоупругость рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок на основе теории трехслойных конструктивно- ортотропных оболочек 50

Автоматизация процессов контроля и управления **69**

Аникевич К.П., Зацаринная Т.Г., Браславский Ю.В. Особенности работы автоматического регулятора мощности в режиме «Н» 69

Титаренко О.Н., Тимофти Н.А. Автоматизация учета электроэнергии на предприятии как элемент энергосбережения 79

Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии **84**

Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Ивантеев И.С.,.Абейдулин С.А. Использование фотоэлектрических систем для электрообеспечения портовых сооружений 84

Титаренко О.Н., Симонов И.В. Комбинированная электроэнергетическая система на основе возобновляемой и водородной энергетики 90

Электротехнические комплексы и системы **96**

Богдан А.Р., Смирнов В.В. Влияние условий внешней среды на результаты инфракрасной диагностики 96

Завьялов В.М., Углов А.В., Углова М.Б., Дубков Е.А. Схемотехническое решение системы непрерывного тестового контроля статических реле направления мощности РСМ-13 и реле максимального тока РСТ-13 101

Канов Л.Н., Кутовой Н.С Трансформатор постоянного тока 110

Канов Л.Н., Солодкий А.В. Стоячие волны напряжения в контактной сети городского электротранспорта 115

Титаренко О.Н., Поляков Д.Р. Использование активных фильтров для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения 121

Яковенко Н.А., Смирнов В.В. Актуальность применения элегазовых выключателей на современном этапе развития электроэнергетики 126

Химические технологии **130**

Гавриш В.М., Черкашина Н.И.,Чайка Т.В. ,.Разина В.А, Тарасевич Д.В. Расчетно-экспериментальное исследование композитных материалов для защиты от излучения 130

Ерофеев В.А., Черкашина Н.И. Оценка эффективности очистки сточных вод от вредных примесей сорбентами на основе лигнина и выбор технологической схемы очистки 136

Федорова С.А., Гавриш В.М., Гавриш О.П. Моделирование влияния нанопрошка вольфрама на прочностные характеристики пластмасс 143

Черкашина Н.И. Адсорбционные характеристики сорбента на основе рисовой шелухи при извлечении меди в одиночных и двоичных системах 149

Экологическая безопасность **155**

Дербасова Н.М, Раджабов В.Н Мониторинг динамики отдельных таксационных показателей древостоев пробной площади № 19 «Дубняк разнотравноснытевый в районе расположения Курской АЭС» 155

Кучерик Г.В., Омельчу Ю.А. ,Заблоцкая Е.В Использование двухкамерных электролизеров для выделения из воды хлоридов и сульфатов 163

Статья удалена редакцией

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant **7**

Braslavskiy Yu.V., Matuzaev K.B, Merzlikin G.Ya., Sukrushev A.V. Safety Evaluation of Nuclear Installation with WWER-1000 in Case of Unexpected Steam Relief Valves Opening in the Secondary Circuit 7

Yermakova D.G., Lysyuk A.P., Frolova M.A., Bezotosniy S.S. Automatic system for controlling the efficiency of combustion of fuel in the furnace of a steam boiler 13

Zhuravlev A.A., Pukhliy V.A., Lepekha O.G., Pantel O.V., Korneeva N.K., On the problem of thermoelasticity of structural elements of nuclear energy in the form of trapezoidal plates 22

Kachur S.A., Butovich E.V., Zozulin A.A. Determination of the influence of control rods on the form of energy release of the reactor core on the basis of statistical methods 31

Kulyutkina T.F., Miroshnichenko E.V., Matuzaeva O.V. Vertical reactor plant for growing nanoheteroepitaxial structures from the liquid phase 38

Moroz N.A., Andreyeva E.V., Chuprinin S.A., Zamislova T.N., Kostov M.A. Prevailing and perspective methods of "in bulk" radioactive waste extraction. Experience of using the extraction systems on the nuclear power objects 42

Pukhliy V.A., Pukhliy K.V. Thermoelasticity of working blades of gas turbine and combined installations based on the theory of three-layer structural-orthotropic shells 50

Process automation and control **69**

Anikevich K.P., Zatsarinnaya T.G., Braslavskiy Yu.V. Operation features of automatic power adjustor acting in mode 'N' 69

Titarenko O.N., Timofti N.A. Automation of electricity metering in the enterprise as the energy saving element 79

Alternative and renewable energy sources **84**

Kuvshjnov V.V., Kakyshina E.G., Ivantyeyev I.S. ,Abeydulin S.A. Using a combined thermophotovoltaic system for an autonomous consumer 84

Titarenko O.N., Simonov I.V. Combined electric power system based on renewable and hydrogen energy 90

Electrotechnical complexes and systems **96**

Bogdan A.R., Smirnov V.V. Influence of environmental conditions on the results of infrared diagnostics 96

Zavyalov V.M., Uglov A.V., Uglova M.B., Dubkov E.A. Circuitry solution of the continuous test control system of static power direction switches PCM-13 and overcurrent relay PCT-13 101

Kanov L.N., Kutovoy N.S. Transformer of Direct-current 110

Kanov L.N., Solodkiy A.V. Standings waves of Tension in the Contact network of City electrotransport 115

Titarenko O.N., Polyakov D.R. Use of active filters to improve the quality of

electric energy in power supply systems 121

Iakovenko N.A., Smirnov V.V. Relevance of gas-insulated switches at the current stage of electric power industry development 126

Chemical technology of nuclear power plants 130

Gavrish V.M., Cherkashina N.I. , Chayka T.V., Rasina V.A.,.Tarasevich D.V Computational and experimental studies of composite materials for radiation protection 130

Erofeev V.A., Cherkashina N.I. Evaluation of the efficiency of wastewater treatment from harmful impurities by sorbents based on lignin and the choice of technological scheme 136

Fedorova S.A., Gavrish V.M., Gavrish O.P. Modeling the effect of tungsten nanoprogram on the strength characteristics of plastics 143

Cherkashina N.I. Adsorption characteristics of rice husk sorbent in copper extraction in single and binary systems 149

Environmental Safety 155

Derbasova N.M, Radjabov V.N Monitoring the dynamics of individual taxation indices of tree species of a permanent trial plot No. 19 “Dubnyak is diverse in the area of Kursk NPP location” 155

Kucherik G.V., Omelchuk Yu.A., Zablotskaya E.V. The use of two-chamber electrolyzers for the separation of chlorides and sulfates from water 163

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК.621.039.586

Оценка безопасности ЯЭУ с ВВЭР-1000 при непредусмотренном открытии паросбросных устройств второго контура

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 07.10.2019 г.; после доработки 10.10.2019 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 непредусмотренного открытия паросбросного устройства второго контура с последующим его нахождением в открытом положении.

Ключевые слова: ядерная установка, водо-водяной реактор, безопасность, паросбросное устройство

Safety Evaluation of Nuclear Installation with WWER-1000 in Case of Unexpected Steam Relief Valves Opening in the Secondary Circuit

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 07.10.2019 y.; received in final form 10.10.2019 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 unexpected steam relief valves opening in the secondary circuit is evaluated in the article.

Keywords: nuclear installation, WWER type reactor, safety, steam relief valve

Введение

Основная цель безопасности ядерной энергетической установки – защита общества и окружающей среды от радиологической опасности путем создания и поддержания на АЭС эффективных защитных мер [1].

В процессе эксплуатации ЯЭУ предусмотрен ряд защитных устройств, обеспечивающих защиту ядерной установки от превышения параметров свыше установленных пределов. К таким элементам для первого контура ЯЭУ с ВВЭР относятся импульсно-предохранительные устройства компенсатора давления, обеспечивающие защиту контура от аварийного повышения давления, а для второго контура данную функцию выполняют блочные редукционные установки для сброса пара в конденсатор (БРУ-К), атмосферу (БРУ-А), а также импульсно-предохранительные устройства парогенераторов (ИПУ ПГ). Все они получили названия

паросбросных устройств второго контура (ПСУ) [2].

Ситуации, приводящие к повышению давления пара в паропроводах ЯЭУ, могут возникнуть, например, при аварийном отключении турбины (закрытии ее стопорных клапанов) на тот период времени, пока мощность реактора не будет снижена до значения, соответствующего отключенной турбине.

В то же время случались ситуации, когда ПСУ второго контура, выполнив свою функцию снижения давления, не возвращалось в исходное состояние (т. е. не закрывалось) из-за отказа и давление пара в паропроводах продолжало снижаться. Также возможен отказ ПСУ, при котором оно может открыться без наличия на это какой-либо необходимости с последующим незакрытием [3].

В обоих случаях резко увеличится отвод тепла от активной зоны реактора. Это видно из основного уравнения теплопередачи, которое для стационарного процесса имеет следующий вид:

$$Q = K \cdot F \cdot \Delta t, \quad (1)$$

где Q – количество тепла, передаваемое от одного тела к другому;

K – коэффициент теплопередачи, зависящий от физической природы контактируемых тел;

F – площадь поверхности контакта тел;

Δt – разность температур контактируемых тел.

Именно последняя величина обуславливает увеличение количества передаваемого тепла в указанной ситуации. Ведь при открытии ПСУ второго контура резко снижается температура его насыщения (из-за снижения давления).

Соответственно, множитель Δt также растет, а остальные величины уравнения (1) остаются неизменными.

Это приводит к захолаживанию теплоносителя первого контура и, как следствие отрицательной обратной связи по температуре теплоносителя – к выделению положительной реактивности и увеличению мощности реактора.

В свою очередь, резкое увеличение мощности может быть причиной перегрева и повреждения оболочек наиболее энергонапряженных топливных элементов.

Поэтому оценка безопасности всей ЯЭУ в данных условиях является достаточно важной для определения надежности установки при нарушениях нормальной эксплуатации и аварийных ситуациях.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью выполняемого исследования является проведение анализа безопасности ядерной энергетической установки с ВВЭР-1000 при непредусмотренном открытии и последующем незакрытии паросбросных устройств второго контура. 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 величиной вносимого возмущения, которая, в свою очередь, зависит от времени открытия и расхода среды через паросбросное устройство.

В качестве исходного события принималось непреднамеренное открытие ИПУ ПГ-3 с последующей непосадкой. Подобный режим является наиболее консервативным, т.к. характеризуется таким же расходом среды, как и через БРУ-А и БРУ-К, а также минимальным временем открытия ИПУ ПГ по сравнению с указанными клапанами. Поэтому результаты моделирования могут быть применимы также для обоснования режимов открытия и непосадки клапанов БРУ-К и БРУ-А.

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	3

активной зоны, %	
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.

В ходе анализа были рассмотрены два варианта сопутствующих исходных событий:

1. Для анализа безопасности учитывались независимые от исходного события отказы БРУ-А на паропроводе ПГ-4 и первого ИПУ ПГ-4. Принятые отказы позволяют получить наиболее консервативные параметры теплоносителя на входе в реактор и значения давления первого и второго контуров.
2. Для анализа возможности возникновения повторной критичности в результате захолаживания теплоносителя реактора рассматривался вариант с отказом блокировки на запрет подачи питательный воды в «аварийный» ПГ-3, что определяет возможность более глубокого захолаживания теплоносителя и внесению положительной реактивности.

Кроме того, было принято допущение, что оператор начинает действия по управлению аварией не раннее чем через 30 минут с момента ее начала.

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

Оценка безопасности ЯЭУ при непредусмотренном открытии ПСУ второго контура

Для проведения анализа использовалась четырехпетлевая модель ЯЭУ, прототипом которой является энергоблок АЭС с ВВЭР-1000 (В-320). Все вычислительные процессы выполнялись с помощью программного кода RELAP-5.

Оценка безопасности реакторной установки проводилась на основании критериев, сходных с приемочными критериями ЯЭУ при ее проектировании:

- давление в первом и втором контурах не должно превышать расчетное более чем на 15%;
- минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи с вероятностью не менее 95 % должен быть не менее 1,0;
- отсутствие плавления топлива: температура «выгоревшего» топлива – не более 2570°С, температура «свежего» топлива – не более 2840°С;
- температура оболочек твэл – не более 1200°С;
- локальная глубина окисления оболочек твэл – не более 18 % от первоначальной толщины оболочки;
- доля прореагировавшего циркония - не более 1 % его массы в оболочках твэл;
- не допускается повторный выход в критическое состояние (повторная критичность).

При проведении расчета было получено, что открытие ИПУ ПГ (с учетом постоянного расхода пара на турбогенератор) приводит к снижению температуры и давления во втором контуре и, следовательно, в первом контуре.

В результате снижения температуры теплоносителя первого контура, вследствие отрицательной обратной связи, происходит увеличение нейтронной мощности реактора.

В случае отказа дополнительных защит мощность энерговыделений возрастает вплоть до значения уставки аварийной защиты (АЗ) реактора по нейтронной мощности.

Аварийная защита по увеличению плотности нейтронного потока до 107 % срабатывает на 32с режима, что переводит реактор в подкритическое состояние (рисунок 1).

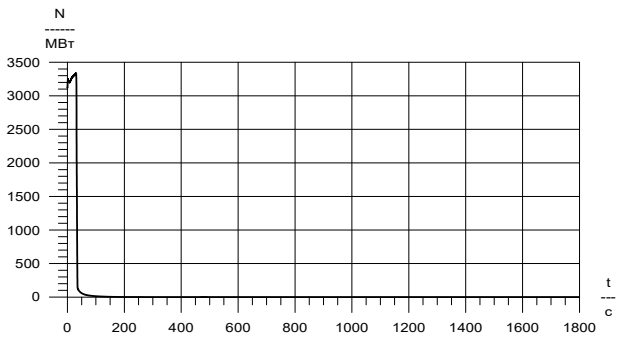


Рис. 1. Тепловая мощность реактора после срабатывания АЗ

В результате обесточивания происходят

отключения оборудования, которые приводят к ухудшению отвода тепла остаточного тепла от первого контура. После окончания выбега главных циркуляционных насосов в первом контуре устанавливается естественная циркуляция теплоносителя.

Условий для возникновения пароциркониевой реакции не возникает. Минимальное значение коэффициента запаса достигается на 31,2с режима и составляет 1,4 (рисунок 2).

Максимальная температура топлива, равная 1972°С, достигается на 30,7с (рисунок 3). Максимальная температура оболочки твэл, на 34с режима, достигает значения 350°С (рисунок 4).

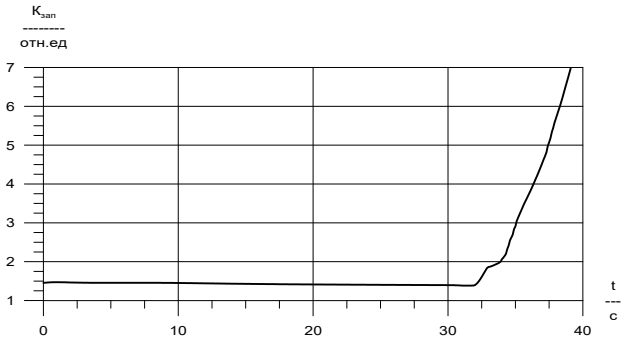


Рис. 2. Коэффициент запаса до кризиса теплообмена

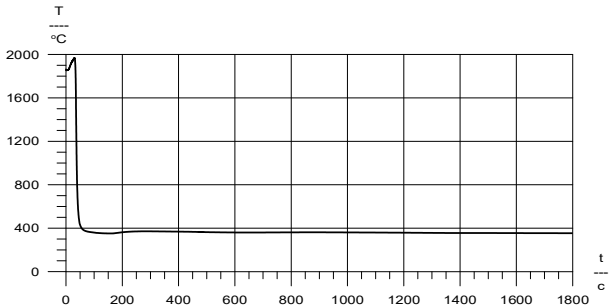


Рис. 3. Максимальная температура топлива

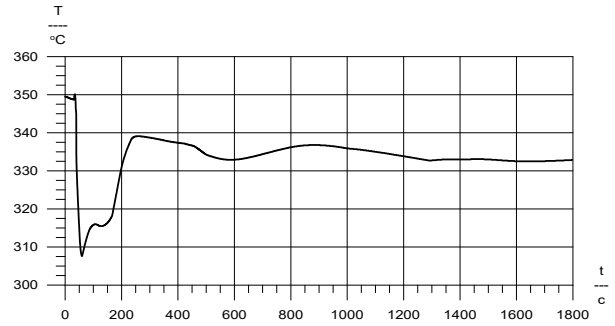


Рис. 4. Максимальная температура оболочки твэл

Подача аварийной питательной воды в ПГ-1, 2 и 4, начинается на 150с режима. Подача питательной воды в ПГ-3 невозможна по уставкам «разрывной» защиты второго контура.

Истечение из аварийного ИПУ ПГ-3 приводит к осушению парогенератора и исключению его из процесса расхолаживания (рисунок 5).

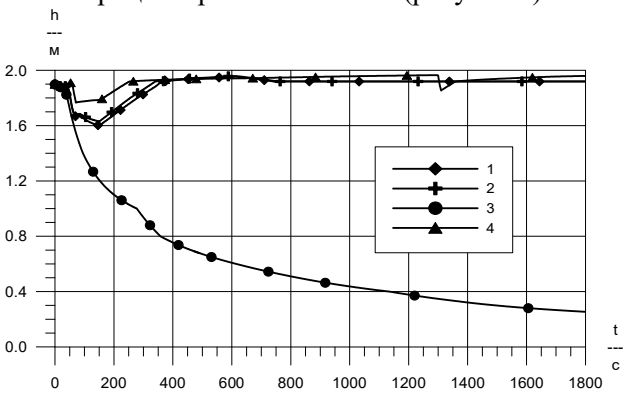


Рис. 5. Уровни в парогенераторах при первом варианте расчета

Истечение из неаварийных ПГ отсутствует вследствие наличия обратного клапана на паропроводе ПГ-3.

Дальнейшее расхолаживание реактора осуществляется посредством сброса пара через БРУ-А на паропроводах ПГ-1, 2, работающих в режиме регулирования давления, и ИПУ ПГ4.

Отказы БРУ-А на паропроводе ПГ-4 и первого ИПУ ПГ-4 приводят к росту давления второго контура и, соответственно, к увеличению температуры в первом контуре.

Максимальное давление второго контура определяется давлением срабатывания ИПУ ПГ и на 58с достигает максимального значения, равного 8,43 МПа.

Значения параметров первого и второго контуров определяются работой БРУ-А на паропроводах ПГ-1, 2, работающих в режиме регулирования давления, и периодическими срабатываниями второго ИПУ ПГ-4.

При расчете второго варианта протекания аварии все процессы до момента срабатывания аварийной защиты реактора аналогичны первому варианту.

При этом максимальные значения температур оболочки твэл и топлива, минимальное значение коэффициента запаса до кризиса теплообмена, моменты времени достижения экстремальных параметров также равны значениям для первого варианта.

Подача аварийной питательной воды во все ПГ начинается на 150с режима. По мере восстановления уровня в парогенераторах происходит перераспределение расхода питательной воды от трех АПЭН, в результате в аварийный ПГ-3 подается максимальный расход – 450 м^3/ч (рисунки 6, 7).

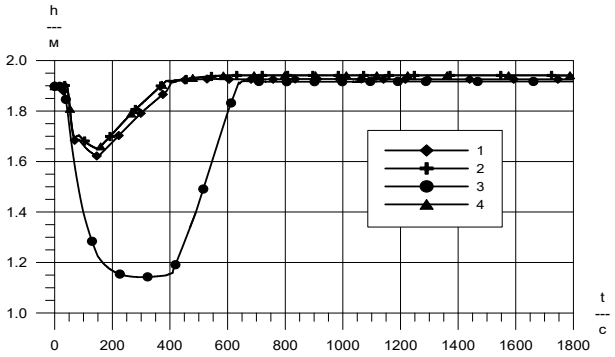


Рис. 6. Уровни в парогенераторах при втором варианте расчета

Непрекращающееся истечение через ИПУ ПГ-3, с учетом подачи аварийной питательной воды, приводит к непрекращающемуся захолаживанию теплоносителя первого контура (рисунок 8).

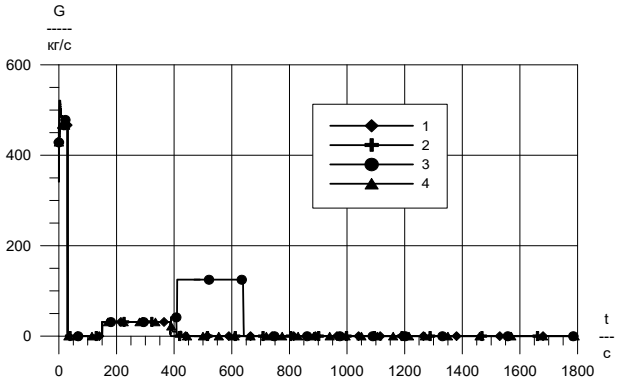


Рис. 7. Расходы питательной воды в парогенераторы

В результате снижения температуры теплоносителя в активную зону вносится положительная реактивность. К 1800 с режима подкритичность активной зоны составляет 0,02 (рисунок 9).

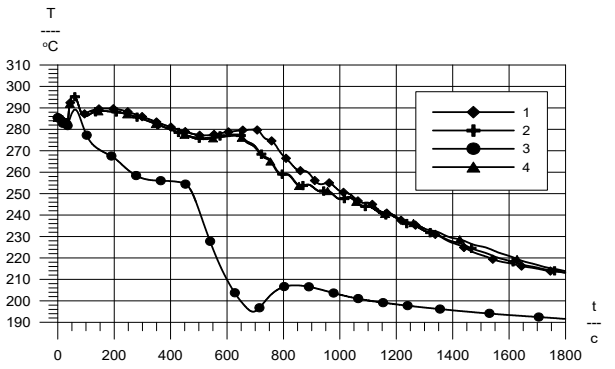


Рис. 8. Температура теплоносителя на выходе из петель первого контура

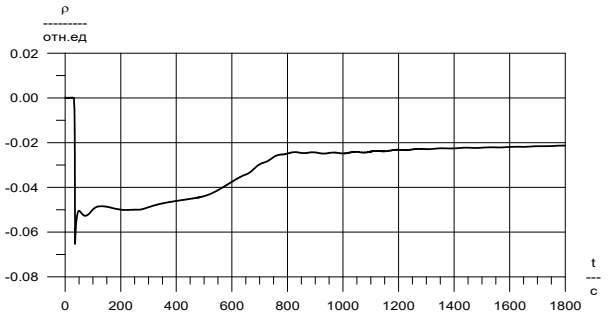


Рис. 9. Изменение реактивности

Из рисунка 9 видно, что условия для повторного выхода реакторной установки в критическое состояние отсутствуют.

Таким образом, результаты расчета показали, что при принятых исходных данных, начальных и граничных условиях обеспечивается выполнение критериев, характеризующих безопасность ядерной установки:

- минимальное значение коэффициента запаса достигаемое в ходе режима 1,38;
- максимальная температура топлива составляет 1972°С;
- максимальная температура оболочки твэла составляет 350°С;
- минимальный коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи равен 1,4;
- реакция окисления оболочек твел не возникает;
- после срабатывания АЗ не происходит повторного выхода в критическое состояние, подкритичность активной зоны, к 1800с режима, составляет 0,02.

Заключение

Проведенные исследования по оценке безопасности ядерной установки с ВВЭР-1000 при непредусмотренном открытии паросбросных устройств второго контура 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 621.039.56

Система регулирования экономичности сжигания топлива в топке парового котла

Ермакова Д.Г.[1], Лысюк А.П. [1], Фролова М.А. [2], Безотосный С.С. [3]
[1]Одесский национальный политехнический университет, Украина, г. Одесса, 65044,
[2]Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования севастопольский государственный университет, Россия, г. Севастополь, 299015, frolova-85@mail.ru
[3]ОАО «ВНИИ АЭС» Россия, г. Севастополь, 299015, 79787391497@ya.ru

Статья поступила 16.10.2019 г.; после доработки 18.10.2019 г.

Аннотация

Статья посвящена исследованию процессов сжигания газообразного топлива с переменным составом. Оптимальные режимы сжигания топлива с точки зрения учета состава дымовых газов, могут находиться в разных областях значений коэффициента избытка воздуха. В статье подчеркивается, что все автоматические системы регулирования экономичности процесса сжигания учитывают только одну составляющую оптимизации процесса сжигания и отдельно не могут обеспечить всего комплекса задач, возникающих при сжигании топлива. В работе рассмотрены основные принципы повышения качества и точности регулирования процесса сжигания газообразного топлива. Предлагается решение задачи автоматической оптимизации процесса сжигания топлива в котельной установк

Ключевые слова: автоматизация, экономичность сжигания, котел ГМ-50, паровой котел, система регулирования.

Automatic system for controlling the efficiency of combustion of fuel in the furnace of a steam boiler

Yermakova D.G. [1], Lysyuk A.P. [1], Frolova M.A. [2], Bezotosniy S.S. [3]
[1]National technical University of Ukraine «Odessa national Polytechnic University», Ukraine, Odessa, индекс,
[2]Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Sevastopol State University", RF, Crimea, Sevastopol, frolova-85@mail.ru

Received 16.10.2019 y.; received in final form 18.10.2019 y.

Abstract

The article is devoted to the study of combustion processes of gaseous fuels with variable composition. The optimum modes of combustion of fuel in terms of accounting for the composition of flue gases, may be in different areas of the valuesof the coefficient of excess air. The article emphasizes that all automatic systems for controlling the economy of the combustion process take into account only one component of the optimization of the combustion process and can not separately provide the whole complex of problems that arise during the process of combustion of fuel. The paper considers the main principles of improving the quality and accuracy of the regulation of the burning process of gaseous fuels. The solution of the problem of automatic optimization of fuel burning process in the boiler installation is proposed.

Keywords: automation, efficiency of combustion, boiler GM-50, steam boiler, control system.

Введение

Процесс сжигания топлива должен осуществляться с максимальной экономичностью, а потери теплоты при ее передаче поверхностям нагрева должны быть минимальными.

Экономичность процесса сжигания в топочной камере котельного агрегата достигается при поддержке соответствия между расходом топлива и расходом воздуха, избытка воздуха в топке по пароперегревателем (содержание

O2,%), а также поддержкой устойчивости факела. При оптимальном значении разрежения уменьшаются присасывания холодного воздуха в топку и выбивания дымовых газов из топки в пространство котельного цеха. Внедрение систем автоматической оптимизации процесса сжигания топлива в котельных установках обеспечивает повышение коэффициента полезного действия котла, уменьшение вредных выбросов, сокращение расхода энергии на собственные нужды и увеличение межремонтных сроков работы оборудования.

Анализ последних исследований и публикаций

Исследованием процессов сжигания газообразного топлива с переменным составом занимались Клюев, Е.Хватов, Г.Плетнев, М.Дуель, А.Горелик тому подобное. Стоит отметить исследования В.Котлера «Опыт компании MitsuiBabcock по снижению выбросов оксидов азота на электростанциях» [1], которое внесло большой вклад в развитие концепции экономичности сжигания. Исследование В.Бережной «Методы многокритериальной оптимизации» [2] позволяет выделить основные принципы оптимизации сжигания паровым котлом.

Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы

Однако из-за отсутствия фундаментальных исследований в рамках этой проблемы учеными недостаточно внимания уделено автоматической системе регулирования экономичности сжигания топлива, а существующие новации в этой сфере не разграничены на уже испытанные и перспективные.

Формулирование целей статьи (постановка задачи)

Таким образом, целью статьи является разработка модели повышения качества и точности регулирования процесса сжигания природного газа в результате решения задачи автоматической оптимизации процесса сжигания топлива в котельной установке.

Изложение основного материала исследования

Объектом регулирования является паровой водотрубный вертикальный однобарабанный котел Белгородского производства с естественной циркуляцией, выполнен по П-образной схеме типа ГМ-50. Котел производительностью 75 т / ч предназначен для выработки перегретого пара с рабочим давлением 40 кгс / см2 (0,4 МПа) и температурой перегретого пара 440 ° С. Высокая надежность, широкий диапазон регулирования, а также стабильная циркуляция воды при всех нагрузках позволяют потребителю использовать котлы этого типа для различных нужд (рис.1).

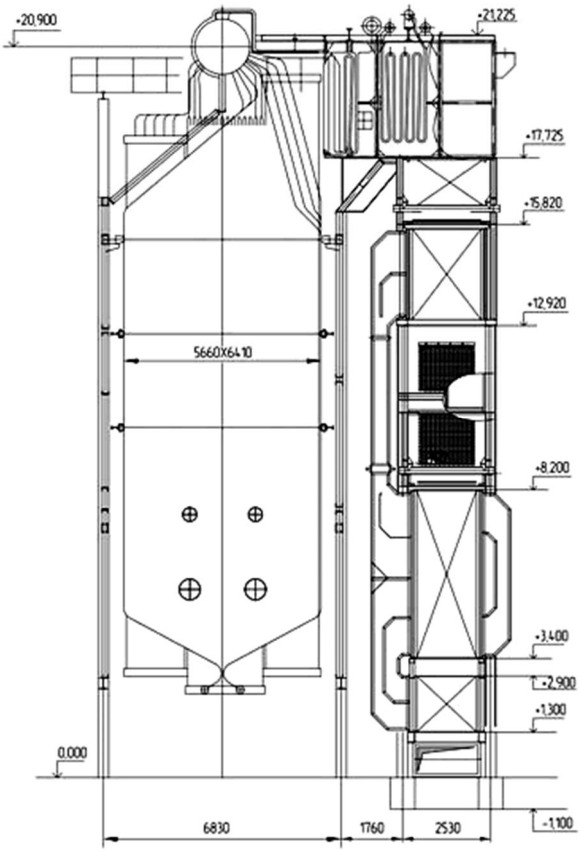


Рис.1 Конструкция котлоагрегата ГМ-50.

Природные газы газовых месторождений состоят в основном из метана (от 82% до 98%) и других углеводородов - этана, пропана, бутана, пентана (от 1 до 8%), входящих в понятие «тяжелые углеводороды». Также природные газы содержат небольшое количество негорючих или балластных, газов - азота N2 (от 1 до 8%) и углекислого газа CO2 (менее 1%), а также вредных примесей: сероводорода, смолы, пыли, аммиака, от которых газы очищают до подачи их потребителям [3]. При сгорании органических топлив продукты сгорания в основном содержат углерод, водород, кислород, азот и их окислы. Наиболее полно разработанным для определения состава продуктов сгорания в настоящее время является метод расчета равновесных концентраций

продуктов реакций, который может быть использован для исследования статики процесса горения.

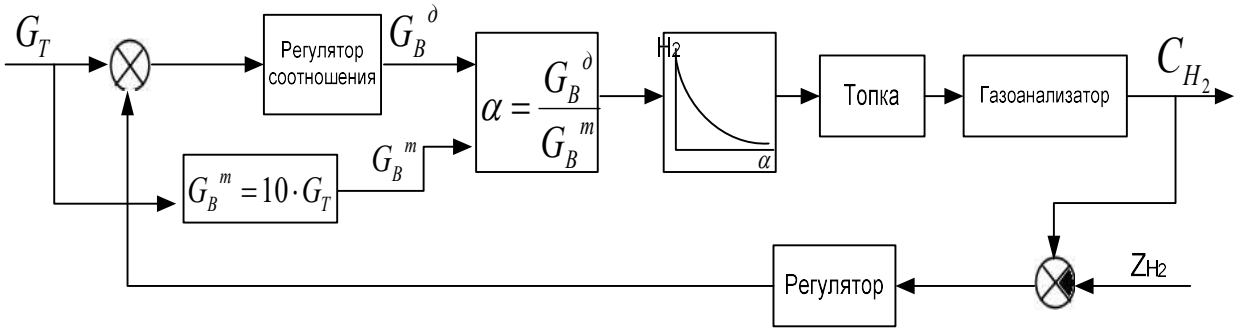


Рис. 2 Структурная схема моделирования нелинейной модели процесса сгорания

Изменение нагрузки котла вызывает необходимость изменения подачи топлива в топливных устройств. В зависимости от изменения подачи топлива в топку необходимо регулировать расход необходимого для сгорания количества воздуха так, чтобы сохранялась устойчивость соотношения «топливо-воздух» с заданным коэффициентом избытка воздуха. В зависимости от коэффициента избытка воздуха изменяется содержание продуктов сгорания, которые характеризуют экономичность процесса горения при температуре продуктов сгорания.

Математическая модель объекта регулирования и регулятора:

Для расчета адиабатической температуры сгорания вводится уравнение энергетического баланса топки:

$$Q_H^C + H_{TЛ} + Q_B - Q_3 = V_Г \cdot c_{ПГ} \cdot t_{ад}$$

где Q^C_H - низшая теплота сгорания сухого топлива; $H_{ТЛ}$- физическое тепло топлива; Q_B- тепло, которое вносит в топку воздуха; $Q_З$ - потеря тепла с химическим неполнотой сгорания (при α> 1 Q3 = 0); $C_{ПГ}$ - объемная теплоемкость продуктов сгорания; $VГ$ – объем дымовых газов; *tад* - адиабатическая температура сгорания.теплв, внесенное в топку воздухом, определяется из выражения:

$$Q_B = \alpha \cdot V_0 \cdot c_B \cdot t_B$$

где: α- коэффициент избытка воздуха; V_0 - теоретическая количество воздуха, которое необходимо для полного сгорания топлива; c_B- теплоемкость воздуха; t_B - температура воздуха после воздухоподогревателя.

$$V_0 = 0{,}0476 \cdot (0{,}5 \cdot CO + 0{,}5 \cdot H_2 + 2 \cdot CH_4 + 3{,}5 \cdot C_2H_6 + 5 \cdot C_3H_8 + 6{,}5 \cdot C_4H_{10} + 8 \cdot C_5H_{12} - O_2 + 1{,}5 \cdot H_2S), м^3/м^3$$

$$V_{CO_2} = 0{,}01 \cdot (CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} + 5 \cdot C_5H_{12} + CO_2 + 1{,}5 \cdot H_2S + CO_2), м^3/м^3$$

$$V_{H_2O} = 0{,}01 \cdot (2 \cdot CH_4 + 3 \cdot C_2H_6 + 4 \cdot C_3H_8 + 5 \cdot C_4H_{10} + 6 \cdot C_5H_{12} + H_2 + 0{,}124 \cdot d_Г + 1{,}61 \cdot V_0) + 0{,}0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_0, \quad м^3/м^3$$

$$V_{N_2} = 0{,}79 \cdot \alpha \cdot V_0 + 0{,}01 \cdot N_2, \quad м^3/м^3$$

$$V_{O_2} = \begin{cases} 0{,}21 \cdot (\alpha - 1) \cdot V^0, при \quad \alpha > 1 \\ 0, при \quad \alpha \le 1 \end{cases}$$

$$C_B = 0{,}31514 + 4{,}4145\cdot10^{-6}\cdot t + 5{,}9062\cdot10^{-8}\cdot t^2 - 5{,}00197\cdot10^{-11}\cdot t^3 + 1{,}7298\cdot10^{-14}\cdot t^4 - 2{,}2118\cdot10^{-18}\cdot t^5, \quad \frac{ккал}{м^3{}^{O}C}$$

$$C_{CO_2} = 0{,}3822 + 0{,}2529\cdot10^{-3}\cdot t - 1{,}6956\cdot10^{-7}\cdot t^2 + 8{,}047843\cdot10^{-11}\cdot t^3 - 2{,}2531\cdot10^{-14}\cdot t^4 + 2{,}6677\cdot10^{-18}\cdot t^5,$$

$$C_{CO_2} = 0{,}3822 + 0{,}2529\cdot10^{-3}\cdot t - 1{,}6956\cdot10^{-7}\cdot t^2 + 8{,}047843\cdot10^{-11}\cdot t^3 - 2{,}2531\cdot10^{-14}\cdot t^4 + 2{,}6677\cdot10^{-18}\cdot t^5,$$

$$C_{N_2} = 0{,}3093 - 5{,}3739\cdot10^{-6}\cdot t + 6{,}2620\cdot10^{-8}\cdot t^2 - 4{,}7710\cdot10^{-11}\cdot t^3 + 1{,}5436\cdot10^{-14}\cdot t^4 - 1{,}8819\cdot10^{-18}\cdot t^5,$$

$$C_{O_2} = 0{,}3114 + 3{,}4105\cdot10^{-5}\cdot t + 4{,}2406\cdot10^{-8}\cdot t^2 - 5{,}4515\cdot10^{-11}\cdot t^3 + 2{,}3107\cdot10^{-14}\cdot t^4 - 3{,}3790\cdot10^{-18}\cdot t^5,$$

Определим показатели качества переходного процесса регулирования по каналу «расход топлива - концентрация кислорода» (рис.2):

- динамическая ошибка (первое отклонение): $y_1 = 0{,}026$ %
- перерегулирование:

$$\Delta y = \left|\frac{y_2}{y_1}\cdot100\%\right| = \left|\frac{-0{,}014}{0{,}026}\cdot100\%\right| = 53\%$$

- время регулирования: t = 80 с

Определим показатели качества переходного процесса регулирования по каналу «расход воздуха - концентрация кислорода»:

- динамическая ошибка (первое отклонение): y_1=0,014 %
- перерегулирование:

$$\Delta y = \left|\frac{y_2}{y_1}\cdot100\%\right| = \left|\frac{-0.0095}{0.014}\cdot100\%\right| = 67\%$$

- время регулирования: t = 90с

Моделирование нелинейной системы регулирования процесса сгорания показало, что форма переходных процессов регулирования существенно зависит от знака возмущения по расходу топлива. Определим основные показатели качества данной системы. Показатели качества переходного процесса регулирования в области нехватки воздуха при возбуждении расходом топлива ΔGB = - 0,12 м$^3\cdot$с$^{-1}$:

- динамическая ошибка (первое отклонение): y_1 = 0,038% (в относительных величинах).
- перерегулирование:

$$\Delta y = \left|\frac{y_2}{y_1}\cdot100\%\right| = 13\%$$

– время регулирования: t = 350 с

Показатели качества переходного процесса регулирования в области избытка воздуха (рисунок 6.12) при возбуждении витратоюпаливаΔGB = + 0,12 м$^3\cdot$с$^{-1}$:

- динамическая ошибка (первое отклонение): $y_1 = -0.005$ % (В относительных величинах)
- перерегулирование:

$$\Delta y = \left|\frac{y_2}{y_1}\cdot100\%\right| = 15\%$$

- время регулирования: t = 480 с

Таким образом, получаем время регулирования в области недопала меньше, чем в области избытка воздуха. Максимальное отклонение концентрации водорода в дымовых газах при возбуждении расходом природного газа 10% номинального расхода не превышает предельно допустимых значений.

На рисунке 3 приведен график зависимости температуры сгорания и адиабатической температуры от коэффициента избытка воздуха.

Из рисунка 2 видно, что при определенных выше условиях температура при коэффициенте избытка воздуха в пределах 0,98 - 1,02 равна примерно 1640 °С.

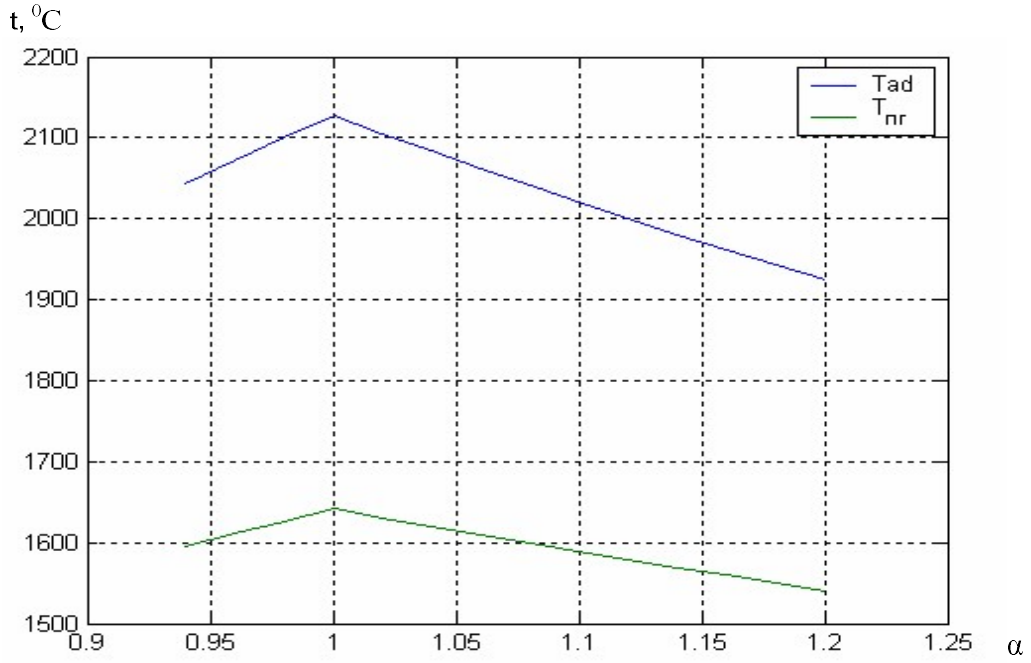


Рис. 3 Зависимость температуры сгорания и адиабатической температуры от коэффициента избытка воздуха

Состав продуктов сгорания определяется температурой, общим давлением, под которым находится газовая смесь, а также весовыми долями химических элементов, входящих в соединения, составляющие продукты сгорания.

Степень диссоциации газа быстро растет с увеличением температуры и зависит от давления.

Со снижением общего давления в продуктах сгорания углеводородных топлив увеличивается относительное содержание продуктов неполного сгорания и вообще всех продуктов, образование которых сопровождается расходом тепла и увеличением химической энергии, то есть степень диссоциации продуктов сгорания увеличивается [4].

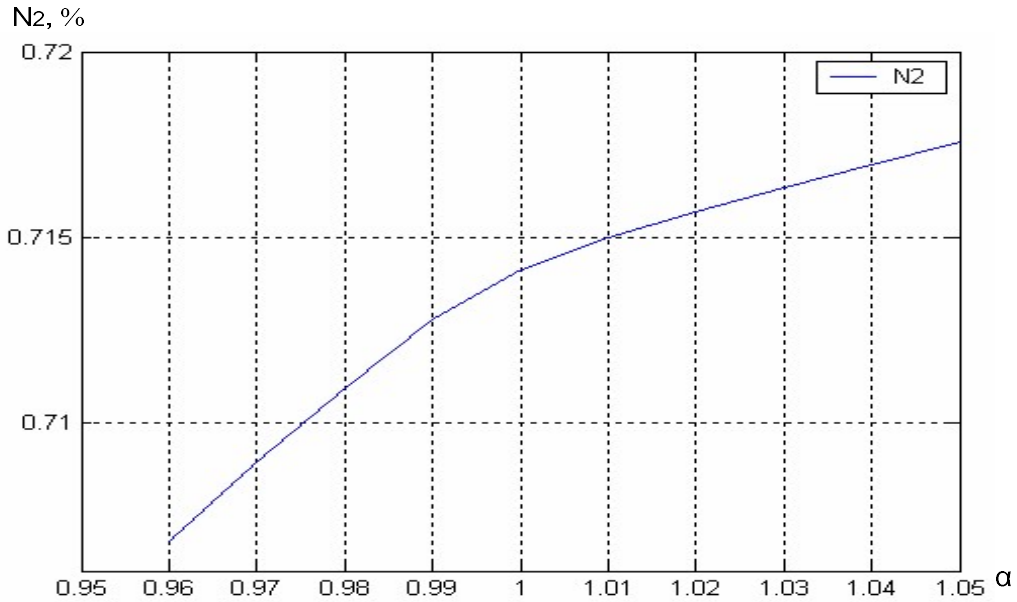


Рис. 4 Зависимость содержания водяных паров N2 в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха

Расчет соединения продуктов сгорания с учетом диссоциации начинается с составления следующих уравнений [4]:

1) уравнений констант равновесия тех реакций, которые учитываются в расчете;
2) уравнений баланса элементов, входящих в горючую смесь;
3) уравнение полного давления продуктов сгорания.

Участком регулирования является топка с примыкая мы к ней газоходами к месту отбора дымовых газов. Возмущающим воздействием по первому каналу, линии подачи топлива, является расход природного газа. Этот канал является первым входом нашего участка, топка котла и связанные с ней газоходы, на выходе из которого регулируемая величина - концентрация кислорода в дымовых газах. Входным регулирующим воздействием является изменение расхода воздуха, регулируемой величиной является концентрация кислорода в дымовых газах. Изменение производительности дутьевого вентилятора осуществляется путем изменением положения направляющего аппарата. Канал подачи воздуха и канал подачи топлива связаны между собой прямой пропорциональной зависимостью.

На вход регулятора воздуха как задача поступает сигнал по расходу топлива, прошедшего через передаточную функцию связи WCB (S). На вход регулятора сгорания подается корректирующий сигнал по содержанию кислорода, что меняет задания регулятору воздуха. Также на вход регулятора сгорания подается задачи по концентрации кислорода в дымовых газах [4].

Недостатком АСР процесса сгорания с использованием сигнала по концентрации кислорода в дымовых газах, с нашей точки зрения, появление значительных похибоквимиру концентрации кислорода O2 вследствие значительного влияния присасывания воздуха в котел, работающий с разрежением в топке.

При этом даже относительно небольшие присосов воздуха, содержащего 21% кислорода, значительно искажает измеряемый сигнал концентрации кислорода, что на порядок меньше концентрации присосов. Поэтому впоследствии появление неорганизованного присасывания воздуха может значительно ухудшить качество регулирования процесса сгорания.

Поэтому в качестве регулируемого параметра состава дымовых газов, На наш взгляд, рационально использовать концентрации водорода H2 и окиси углерода CO, что характеризует химический недожог топлива q3. Эти параметры также слабо искажаются присасыванием воздуха в котел, поскольку в них эти компоненты отсутствуют [4].

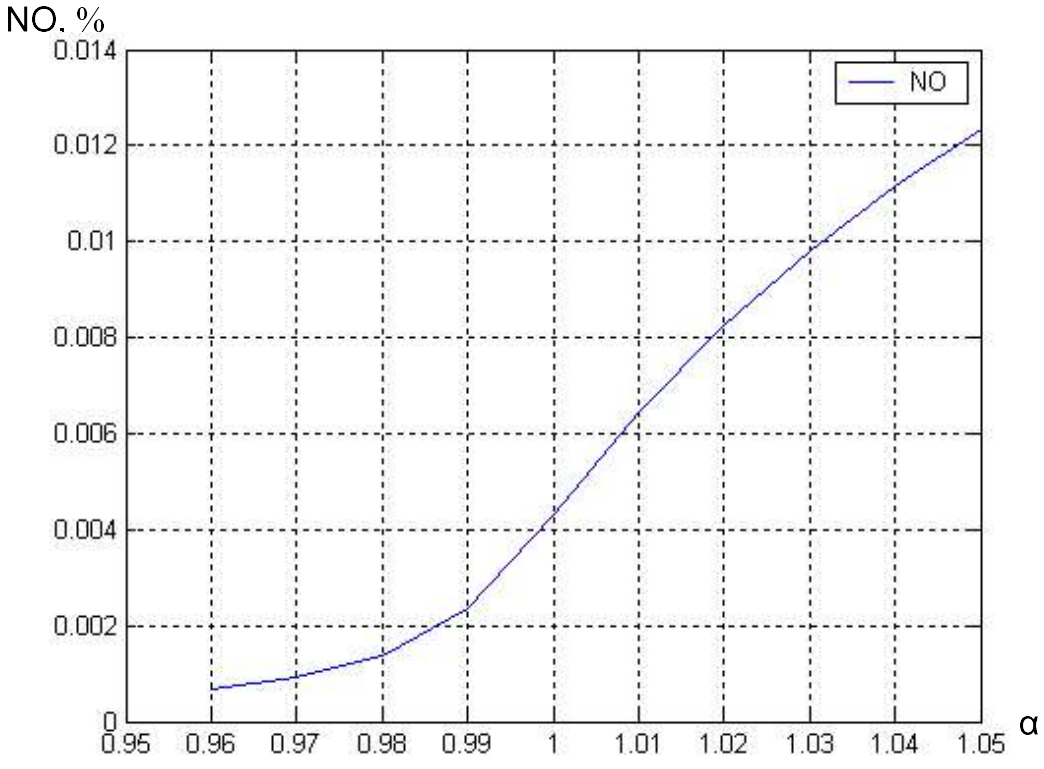


Рис. 5. Зависимость содержания NO в продуктах сгорания от коэффициента избытка воздуха.

В качестве регулятора соотношения «топливо-воздух» выбираем П-регулятор, так как он обеспечивает минимальное время переходных процессов регулирования. Особенностью АСР процесса сгорания является наличие статической ошибки регулирования пропорциональным регулятором соотношения «топливо-воздух», в результате чего коэффициент избытка воздуха в топке может отличаться от оптимального, близкого к стехиометричного. При коэффициенте избытка воздуха, меньше оптимального, в дымовых газах появляются продукты химического недожога топлива - водород и окись углерода. Токсический окись углерода загрязняет окружающую среду, то есть часть топлива не используется в процессе сжигания. При избытке воздуха в топке продукты химического недожога в дымовых газах отсутствуют, однако, топливо тоже перерасходуется, но на бесполезный подогрев окружающей среды. Решение этой задачи, помимо экономии топлива, тянет положительные последствия:

- увеличение КПД котлоагрегата;
- уменьшение платежей за выброс вредных веществ в атмосферу;
- отсутствие загрязнения конвективных поверхностей нагрева;
- уменьшение химического недожога;
- уменьшение потерь теплоты с дымовыми газами.

Модернизацией АСР предусмотрено использование нового оборудования (все цены указаны без учета НДС)

1. Газоанализатор ULTRAMAT / OXYMAT 6E производства ф. Siemens стоимостью 50000 грн.

2. Пробоотборник газа для анализа производства ф. Siemens стоимостью 10000 грн.

3. Менеджер горения для газовых / ридинопаливних горелок LMV52 производства ф. Siemens стоимостью 20000 грн.

4. Термопреобразователь сопротивления платиновый Pt100, Метран 276 производства ОАО «Теплоприбор» стоимостью 2050 грн.

5. Модуль аналогового ввода, 16-ти разрядный АЦП, Adam 4013виробництва ф. Advantech стоимостью 1500 грн.

Создание современных систем управления базируется на разработке и применении адаптивных интеллектуальных систем, функционирование которых невозможно без использования развитой вычислительной сети, включающей персональные компьютеры (ПК), микроконтроллеры и широкий набор модулей ввода / вывода. Усложнение технологических процессов и производств ставит задачу создания распределенных иерархических систем (АСУТП) и их сквозного программирования, объясняет появление новых компьютерных технологий для интегрированных систем, объединяющих все уровни производства.

В качестве примера может быть названа SCADA-система (SupervisoryControlAndDataAcquisition), предназначенная для проектирования и эксплуатации распределенных автоматизированных систем управления.

Судя по названию, SCADA-система предназначена для диспетчерского управления и сбора данных. SCADA-система TRACE MODE 6 разработана и продолжает совершенствоваться российской фирмой-виробникомAdAstraResearchGroup, LTD.

Последний на данный момент продукт - это 5-й релиз 6-й версии TRACE MODE, содержащий полный наборпрограммных средств для создания АСУТП и АСУП. SCADA-система TRACE MODE содержит средства разработки операторского интерфейса (SCADA / HMI), программирование контроллеров (Softlogic), управления основными фондами (EAM), персоналом (HRM) и производственными процессами (MES) [5].

Все программы, входящие в TRACE MODE, подразделяются на две группы: инструментальную систему разработки и исполнительных модулей.

Инструментальной системой разработки является Интегрированная среда (ИС) разработки. ИС - единственная программная оболочка, содержащая все необходимые средства для разработки проекта.

Все переменные проекта, к чему бы они ни относились - к контроллеру, к операторской станции, к управлению техобслуживанием или производством хранятся в единой базе данных проекта. Единая база проекта устраняет лишнюю работу проектировщика по созданию, поддержке и взаимном связыванию во многом одинаковых баз переменных контроллеров и ПК, характерную для систем предыдущего поколения.

Логическая структура проекта полностью отделена от аппаратной части. Благодаря единому пространства распределенных переменных, переменные из разных узлов могут связываться между собой также легко, как и в пределах одного узла, любые изменения, внесенные в объект, автоматически применяются везде, где он был задействован. Инструментальная система устанавливается на рабочем месте разработчика АСУ. В ней создается набор файлов, называется проектом TRACE MODE.

Существует ряд программных модулей, назначение которых четко не привязано к функциям одного из перечисленных уровней систем управления.

К таким модулей относятся:

– - глобальный регистратор;
– - сервер документирования;
– -Web-Активатор;
– - GSM-Активатор [5].

Они могут использоваться для создания как оперативного, так и административного уровней систем управления. TRACE MODE позволяет создавать проект сразу для нескольких исполнительных модулей - узлов проекта.

Каждому узлу проекта отвечает одна инсталляция исполнительного модуля.

Система регулирования процесса горения газа смоделирована в SCADA-системе TRACE MODE 6 и состоит из трех частей (3 экранных форм). На первой экранной форме представлена мнемосхема со всемитехнологическими элементами.

Основные элементы на первой части:

– объект управления со своей технологией;
– приборы визуализации необходимых параметров;
– кнопки переходов на другие части системы.

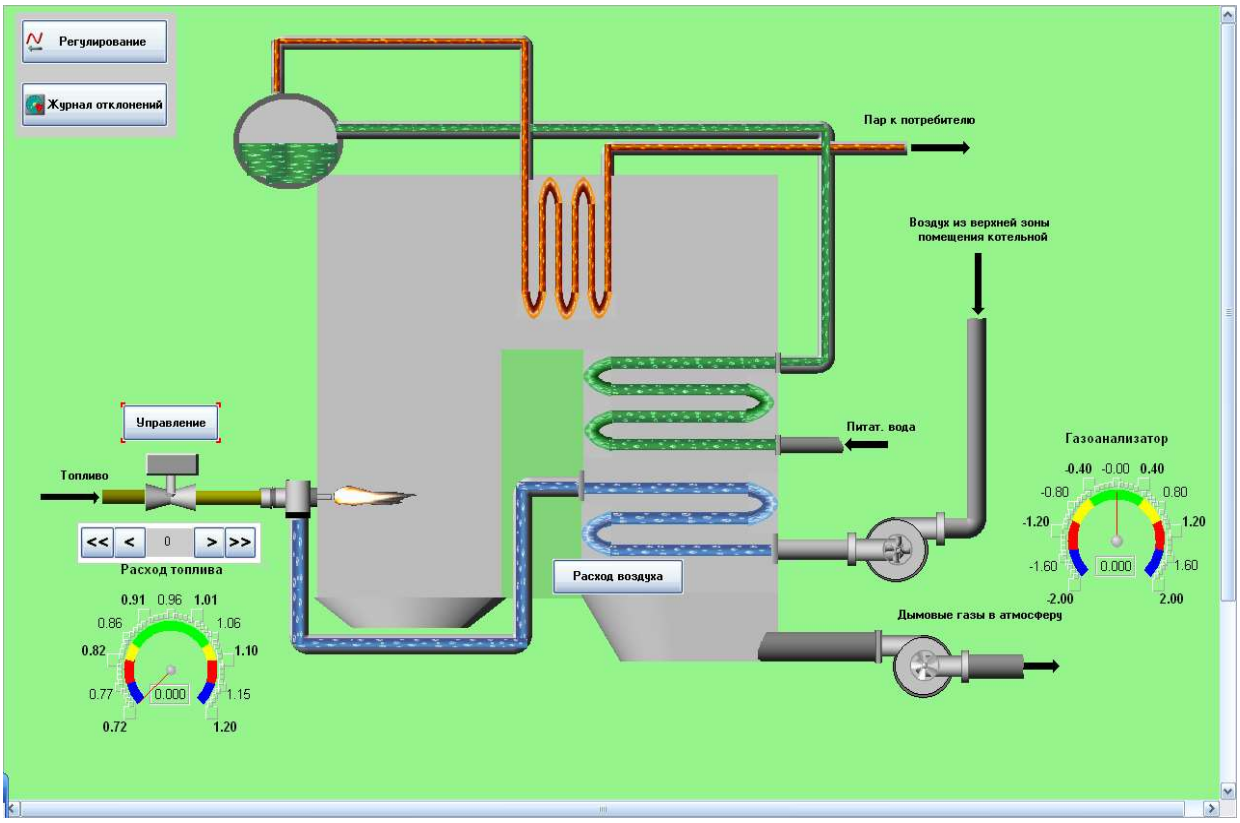


Рис. 6 Мнемосхема модели системы управления

Нужно отметить, что TRACE MODE 6 содержит рекордное количество библиотек ресурсов, готовых к использованию в прикладных проектах.

Она имеет встроенные бесплатные драйверы к более чем 1600 контроллеров и плат ввода / вывода, более 600 анимационных объектов, более 150 алгоритмов обработки данных и управления, комплексные технологические объекты.

Режим автостроения, который применяется в TRACE MODE 6, мгновенно формирует базу тегов для операторских станций, контроллеров и OPC-серверов, настраивает сетевые связи, строит систему документирования и графический интерфейс.

Итак, в статье смоделирована система регулирования процесса сгорания в SCADA-системе TRACE MODE 6, состоящий из трех частей (3 экранных форм).

Создание этой модели позволяет визуально видеть технологический процесс, наносить возмущения и наблюдать переходные процессы регулирования процесса сжигания природного газа.

Выводы из этого исследования

Решение этих задач приведет к повышению качества и точности регулирования процесса сжигания газообразного топлива в результате решения задачи автоматической оптимизации процесса сжигания топлива в котельной установке. решена задача статической оптимизации процесса сгорания, определенный критерий оптимальности, учитывающий экономичность процесса сгорания.

Внедрение модернизированной АСР процесса горения с использованием корректирующих сигналов по составу продуктов сгорания способствует решению основной задачи - эффективного использования топлива при производстве тепловой энергии котельными установками.

Дальнейшие перспективы в этом направлении

Рекомендуем проанализировать практическое применение автоматической системы регулирования экономичности сжигания топлива в топке парового котла, рассмотреть основные проблемы и тому подобное.

Список литературы

1. Теплотехнический справочник. В двух томах. Том 2, ред. В. Юрнев, П. Лебедев, Вид: Энергия, 1976.
2. Автоматические системы регулирования технологическими процессами АЭС, В.А.Демченко, ОНПУ 1994г.
3. Методические указания по курсовому проектированию по дисциплине Автоматические системы управления технологическими процессами объектив АЭС, Одесса, 1988г.
4. Методические указания по курсовому проектированию по дисциплине Автоматические системы управления технологическими процессами объектив АЭС, Регулировка энергоблоков, Одесса, ОНПУ, 1994г.
5. Справочные таблицы: Давление насыщенного пара воды. URL:http://fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html (Дата обращения: 1.05.2019).
6. Методы регулирования температуры перегретого пара.URL:http://msd.com.ua/parovye-kotly-tes/metody-regulirovaniya-temperatury-peregretogo-para/ (Дата обращения: 1.05.2019).
7. Системы турбинного отделения (часть 1), центр подготовки персонала, Росэнергоатом, 2000г.
8. Основное оборудование реакторного отделения (часть 1), центр подготовки ерсоналу, Росэнергоатом, 2000г.

References

1. Teplotekhnicheskii spravoch-nik. V dvukh tomakh. Tom 2, red. V. Yurnev, P. Lebedev, Vid: Energiya, 1976.
2. Avtomaticheskie sistemy re-gulirovaniya tekhnologicheskimi protsessa-mi AES, V.A.Demchenko, ONPU 1994g.
3. Metodicheskie ukazaniya po kursovomu proektirovaniyu po distsipline Avtomaticheskie sistemy upravleniya tekh-nologicheskimi protsessami ob'ektiv AES, Odessa, 1988g.
4. Metodicheskie ukazaniya po kursovomu proektirovaniyu po distsipline Avtomaticheskie sistemy upravleniya tekh-nologicheskimi protsessami ob'ektiv AES, Regulirovka energoblokov, Odessa, ONPU, 1994g.
5. Spravochnye tablitsy: Davle-nie nasyshchennogo para vody. URL:http://fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html (Data obrashcheniya: 1.05.2019).
6. Metody regulirovaniya tem-peratury peregretogo pa-ra.URL:http://msd.com.ua/parovye-kotly-tes/metody-regulirovaniya-temperatury-pere-gretogo-para/ (Data obrashcheniya: 1.05.2019).
7. Sistemy turbinnogo otdele-niya (chast' 1), tsentr podgotovki personala, Rosenergoatom, 2000g.
8. Osnovnoe oborudovanie reak-tornogo otdeleniya (chast' 1), tsentr podgo-tovki ersonalu, Rosen-ergoatom, 2000g.

УДК 539.3

К задаче термоупругости конструкционных элементов атомной энергетики в виде трапециевидных пластин

А.А. Журавлев, В.А. Пухлий, О.Г. Лепеха, О.В. Пантель, Н.К. Корнеева, Е.В. Глушкова

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

Статья поступила 14.10.2019 г.; после доработки 21.10.2019 г.

Аннотация

Многие конструкционные элементы атомных реакторов выполняются в виде различного рода пластин и оболочек. В работе излагается аналитический подход к решению краевой задачи термоупругости для трапециевидных пластин с переменными физико-механическими характеристиками материала (модуля упругости E и коэффициента линейного расширения α. Решение задачи основано на применении вариационного метода Бубнова-Власова и модифицированного метода последовательных приближений, разработанного проф.В.А.Пухлий [5, 6].

Ключевые слова: трапециевидные пластины, физико-механические характеристики материала, краевая задача термоупругости, вариационный метод, модифицированный метод последовательных приближений.

On the problem of thermoelasticity of structural elements of nuclear energy in the form of trapezoidal plates

A.A. Zhuravlev, V.A. Pukhliy, O.G. Lepekha, O.V. Pantel, N.K. Korneeva, E.V. Glushkova

FSAEI of HE "Sevastopol State University", 299015, Russia, Sevastopol, Kurchatov St., 7

Received 14.10.2019 y.; received in final form 21.10.2019 y.

Abstract

Many structural elements of nuclear reactors are made in the form of various kinds of plates and shells. The paper presents an analytical approach to solving the boundary value problem of thermoelasticity for trapezoidal plates with variable physical and mechanical characteristics of the material (elastic modulus E and coefficient of linear expansion α. The solution to the problem is based on the application of the Bubnov-Vlasov variational method and the modified method of successive approximations developed by prof .V.A. Pukhliy [5, 6].

Keywords: trapezoidal plates, physicomechanical characteristics of the material, boundary value problem of thermoelasticity, variational method, modified method of successive approximations.

Введение

За последнее время появилось большое количество работ, связанных с расчетами на прочность косоугольных пластин.

Однако исследований, связанных с термоупругостью косоугольных пластин, известно немного. Одними из первых были работы E.Matsumoto [1,2], в которых определялись напряжения в консольных пластинах переменной толщины под действием равномерной нагрузки и температуры. Решение было найдено методом конечных разностей.

В работе B.Gatewood и N.Ohanian [3] приводится численное решение задачи о напряжениях в тонкой пластине под внешней и температурной нагрузками методом конечных разностей с применением алгебры матриц. Полученное решение

для изотропной прямоугольной пластины постоянной толщины используется затем в методе итераций для определения напряжений в трапециевидной пластине.

В работе Э.И. Григолюка, Ю.К. Коненкова, В.М. Кулакова [4] дается приближенное решение задачи термоупругости для трапециевидной пластины путем аппроксимации трапециевидной области секториально-кольцевой, причем две параллельные стороны трапеции очерчиваются эквивалентными дугами. Для полученной таким способом секториально-кольцевой пластины в полярных координатах строится решение уравнения Пуассона методом Фурье.

В случае переменных физико-механи-ческих характеристик материала, зависящих от температуры, задача значительно усложняется. Между тем при современных расчетах учет этого фактора становится чрезвычайно важным.

В настоящей статье излагается приближенный подход к решению задачи термоупругости для трапециевидных пластин с переменными физико-механическими характеристиками, основанный на синтезе вариационного метода Бубнова-Власова и последовательного метода последовательных при-ближений.

Метод был также распространен на решение начально-краевой задачи математической физики в работе [7]. На основе данного подхода в работе [9] рассматривалась задача термоупругости параллельных пластин.

Постановка цели и задач научного исследования

В атомной энергетике представляют научный интерес расчеты на прочность и термоупругость конструкционных элементов, в частности, трапециевидных пластин.

С этой целью предполагается решение задачи об НДС трапециевидных пластин, описываемых бигармоническим уравнением 4-го порядка в частных производных с переменными коэффициентами.

Формулировка задачи

Рассмотрим изгиб трапециевидной пластины (рис.1), свободно защемленной по двум противоположным сторонам (допускается смещение кромок в плоскости пластины) и имеющей произвольные граничные условия на двух других, для которой решается задача линейной несвязанной квазистатической теории термоупругости.

Задано стационарное температурное поле общего вида T = T(x, y, z).

Модуль упругости E и коэффициент линейного расширения α в каждой точке пластины считаем зависящим от температуры:

$$\mathrm{E}(\mathrm{T})=\mathrm{E}(\mathrm{x},\mathrm{y},\mathrm{z}),\quad \alpha(T)=\alpha(x,y,z) \tag{1}$$

Коэффициент Пуассона полагаем постоянным $\upsilon = const$. В общем случае, как известно, задача оказывается совместной, т.е. задача о нахождении перемещений u, v и усилий N_x, N_y, N_{xy} не отделяется от задачи об изгибе, связанной с определением функции прогиба W(x, y) и моментов M_x, M_y, M_{xy}. В ряде случаев задачу можно упростить, если выбрать соответствующим образом начальную поверхность, ордината которой относительно срединной плоскости имеет вид:

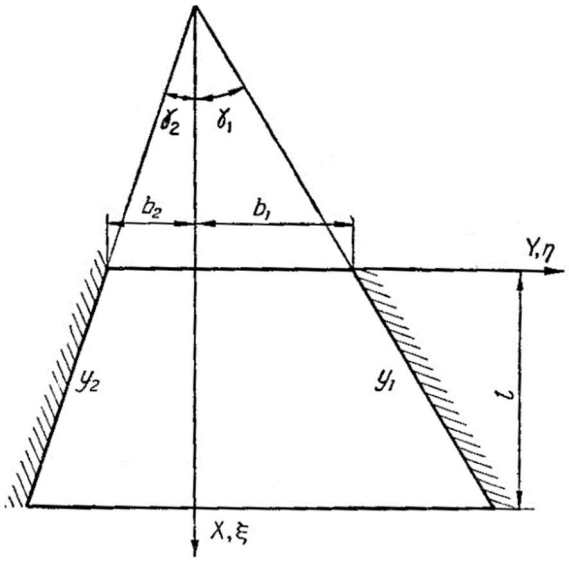


Рис.1. Трапециевидная пластина.

$$\delta=\frac{\int_{-h/2}^{h/2}E(x,y,z)z\,dz}{\int_{-h/2}^{h/2}E(x,y,.z)\,dz}. \tag{2}$$

При законе изменения температуры только по толщине пластины начальная поверхность будет плоскостью $x_1 0_1 y_1$.

Введем безразмерные координаты по формулам:

$$\xi=\frac{\mathrm{x}_1}{\mathrm{l}};\quad \eta=\frac{y_1}{b};\qquad \beta=\frac{z_1}{h};$$

$$z_1=z-\delta.$$

Силовые факторы в безразмерных координатах запишутся так:

$$\mathrm{M}_{\xi} = -\frac{D_1}{l^2}\left(\frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} + \nu m^2 \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2}\right) - M_{T_1};$$

$$\mathrm{M}_{\eta} = -\frac{D_1}{l^2}\left(m^2 \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} + \nu \frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2}\right) - M_{T_1};$$

$$\mathrm{M}_{\xi\eta} = -\frac{D_1}{l^2}(1-\nu) m \frac{\partial^2 W}{\partial \xi \partial \eta}.$$

Здесь $\mathrm{m} = \frac{1}{\mathrm{b}}$ – геометрический параметр пластины;

$$D_1 = h^3 \int_{-\left(\frac{1}{2}+\frac{\delta}{\mathrm{h}}\right)}^{\frac{1}{2}-\frac{\delta}{\mathrm{h}}} \frac{E}{1-\nu^2} \beta^2 d\beta \qquad (4)$$

$$M_{T_1} = h^2 \int_{-\left(\frac{1}{2}+\frac{\delta}{\mathrm{h}}\right)}^{\frac{1}{2}-\frac{\delta}{\mathrm{h}}} \frac{\alpha E T}{1-\nu} \beta d\beta. \qquad (5)$$

В формулах (4), (5) модуль упругости E, температура T и коэффициент линейного удлинения α должны быть выражены через переменную β новой системы координат. В этом случае плоская задача отделяется от задачи изгиба пластины. Исходное уравнение температурного изгиба пластины запишем в форме:

$$\nabla_{\mathrm{m}}^4 W = -\frac{l^2}{D_1} \nabla_m^2 M_{T_1}, \qquad (6)$$

где линейные дифференциальные операторы таковы:

$$\nabla_m^2 = \frac{\partial^2}{\partial \xi^2} + m^2 \frac{\partial^2}{\partial \eta^2};$$

$$\nabla_m^4 = \frac{\partial^4}{\partial \xi^4} + 2m^2 \frac{\partial^4}{\partial \xi^2 \partial \eta^2} + m^4 \frac{\partial^4}{\partial \eta^4}.$$

Представим температурное поле в виде:

$$T(\xi, \eta, \beta) = T(\beta) f(\xi, \eta), \qquad (7)$$

причем $T(\beta)$ – функция изменения температуры по толщине пластины; $f(\xi, \eta)$ – некоторая безразмерная функция.

Функции $T(\beta)$ и $f(\xi, \eta)$ выразим в виде степенных полиномов

$$T(\beta) = \sum_{h=0}^{r} a_h \beta^h; \quad f(\xi, \eta) = \sum_{i=0}^{n} \sum_{j=0}^{m} b_{ij} \xi^i \eta^j. \qquad (8)$$

Считаем, что по краям $\mathrm{y}_1 = k_1 x + b_1 = r$ и $y_2 = k_2 x + b_2 = \alpha r$ (рис.1) пластина свободна защемлена, причем k_1 и k_2 – тангенсы углов наклона сторон пластины; $\alpha = \frac{k_2}{k_1} = \frac{b_2}{b_1}$ – геометрический параметр пластины.

Краевые условия для прогиба $W(x, y)$ примут форму

$$\mathrm{W} = \frac{\partial W}{\partial n} = 0 \qquad (9)$$

Запишем граничные условия для поперечных краев $\xi = \pm 1$ в самом общем случае, когда они опираются на упругие ребра

$$\lambda_1 m^3 \frac{\partial^4 W}{\partial \eta^4} = \left[\frac{\partial^3 W}{\partial \xi^3} + (2-\nu) m^2 \frac{\partial^3 W}{\partial \xi \partial \eta^2} + \frac{l^2}{(1-\nu) D_1} \frac{\partial M_{T_1}}{\partial \xi}\right]$$

$$\lambda_2 \mathrm{m} \frac{\partial^3 W}{\partial \xi \partial \eta^2} = \left[\frac{\partial^2 W}{\partial \xi^2} + \nu m^2 \frac{\partial^2 W}{\partial \eta^2} + \frac{l^2}{(1-\nu) D_1} M_{T_1}\right]$$

. (10)

Здесь $\lambda_1 = \frac{EJ}{bD_1}$; $\lambda_2 = -\frac{GJ_n}{bD_2}$; EJ – жесткость опорного ребра на изгиб; GJ_h – крутильная жесткость ребра.

Решение краевой задачи термоупругости для трапециевидной пластины

К решению уравнения (6) применим вариационный метод Бубнова-Власова. В соответствии с методом запишем решение уравнения (6) в виде разложения

$$\mathrm{W}(\xi, \eta) = \sum_{i=1}^{n} \varphi_i(\xi, \eta) X_i(\xi), \qquad (11)$$

где $\varphi_i(\xi, \eta)$ – система аппроксимирующих функций, удовлетворяющая геометрическим граничным условиям на продольных краях; $X_i(\xi)$ – искомые функции, представляющие обобщенные прогибы пластины.

Ограничиваясь двухчленным приближением, функции φ_1 и φ_2 представим в форме степенных полиномов:

$$\varphi_1 = \eta^4 - 2(1+\alpha) r \eta^3 + (1 + 4\alpha + \alpha^2) r^2 \eta^2 - 2\alpha(1+\alpha) r^3 \eta + \alpha^2 r^4$$

$$\varphi_2 = \eta^5 - \frac{5(1+\alpha)}{2} r\eta^4 + 2\left(1+3\alpha+\alpha^2\right) r^2\eta^3 - \frac{1+9\alpha+9\alpha^2+\alpha^3}{2} r^3\eta^2 + \alpha\left(1+3\alpha+\alpha^2\right) r^4\eta - \frac{\alpha^2(1+\alpha)}{2} r^5 . \tag{12}$$

Подставляя выражение (11) в уравнение изгиба пластины (6) и варьируя его на возможных перемещениях φ_1 и φ_2 получаем:

$$\int \nabla_{\mathrm{m}}^4 W \varphi_i d\eta + \frac{l^2}{D_1} \int \nabla_m^2 M_{T_1} \varphi_i d\eta = 0 \quad (i = 1, 2) \tag{13}$$

Интегралы в уравнениях (13) распространяются на всю ширину пластины и вычисляются в пределах от $\mathrm{km}\xi + 1 = \mathrm{r}$ до αr. Учитывая формулы (12) и вычисляя интегралы согласно (13), приходим к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений четвертого порядка с переменными коэффициентами относительно искомых функций X_1 и X_2.

$$\mathrm{X_I^{IV}} = -18\frac{km}{r} X_1''' - 24\frac{m^2}{r^2} \frac{\left[3k^2\left(1-3\alpha+\alpha^2\right)-1\right]}{(1-\alpha)^2} X_1'' +$$
$$+ 168\frac{km^3}{r^3} \frac{\left(3\alpha k^2+1\right)}{(1-\alpha)^2} X_1' - 168\frac{m^4}{r^4} \frac{\left(3k^4\alpha^4+k^2+3\right)}{(1-\alpha)^4} X_1 +$$
$$+ km(1+\alpha) X_2''' + 18\frac{k^2m^2}{r}(1+\alpha) X_2' +$$
$$+ 36\frac{km^3}{r^2} \frac{(1+\alpha)\left[k^2\left(2-5\alpha+2\alpha^2\right)-1\right]}{(1-\alpha)^2} X_2' -$$
$$- 252\frac{\mathrm{k}^2m^4}{r^3} \frac{(1+\alpha)\left(k^2\alpha+1\right)}{(1-\alpha)^2} X_2 + \frac{l^2}{D_1} \int \nabla_m^2 M_{T_1} \varphi_1 d\eta ; \tag{14}$$

$$X_2^{IV} = -44\frac{km}{r^2} \frac{1+\alpha}{(1-\alpha)^2} X_1''' - 396\frac{k^2m^2}{r^3} \frac{1+\alpha}{(1-\alpha)} X_1^n +$$
$$+ 1584\frac{km^3}{r^4} \frac{(1+\alpha)\left(k^2\alpha+1\right)}{(1-\alpha)^4} X_1^n - 22\frac{km}{r} X_2''' -$$
$$- 22\frac{m^2}{r^2} \frac{\left[3k^2\left(1-6\alpha+\alpha^2\right)-4\right]}{(1-\alpha)^2} X_2^n +$$
$$+ 396\frac{km^3}{r^3} \frac{\left[k^2\left(1+4\alpha+\alpha^2\right)+2\right]}{(1-\alpha)^2} X_2' -$$
$$- 792\frac{m^4}{r^4} \frac{\left[k^2\left(1+3\alpha+\alpha^2\right)\left(k^2\alpha+2\right)+5\right]}{(1-\alpha)^4} X_2 +$$
$$+ \frac{l^2}{D_1} \int \nabla_m^2 M_{T_1} \varphi_2 d\eta . \tag{15}$$

Запишем систему дифференциальных уравнений (14), (15) следующим образом:

$$\mathrm{X_J^{IV}} = \sum_{v=1}^{2} \sum_{i=0}^{3} A_{v,i}^j X_v^i + \Phi_j \quad (j = 1, 2). \tag{16}$$

Переменные коэффициенты $\mathrm{A_{v,i}^J}$ и свободный член Φ_{j} представим степенными полиномами, непрерывными на интервале изменения независимой переменной:

$$A_{v,l}^J = \sum_{k=0}^{q} a_{v,i,h}^J \xi^k \; ; \quad \Phi_J = \sum_{k=0}^{q} f_k \xi^k . \tag{17}$$

Общее решение системы уравнений (16), полученное методом последовательных приближений, имеет вид [5, 6]:

$$\mathrm{X_1} = \sum_{\mu=1}^{r} C_\mu \left[\frac{\xi^{\mu-1}}{(\mu-1)!}\delta + \sum_{n=1}^{\infty} X_{1,\mu,n} \right] + X_1^* ;$$
$$\mathrm{X_2} = \sum_{\mu=1}^{r} C_\mu \left[\frac{\xi^{\mu-5}}{(\mu-5)!}(1-\delta) + \sum_{n=1}^{\infty} \mathrm{X_{2,\mu,n}} \right] + X_2^* ; \tag{18}$$

$$X_{s,\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} b_{s,\mu,j}^n \frac{\xi^{n+j+2}}{(n+j+2)!} \quad (s = 1, 2), \tag{19}$$

где $\beta = n(q+3) + \mu + 4\delta - 7$; $\delta = 1$ при $\mu = 1$, 2, 3, 4; $\delta = 0$ при $\mu = 5 \div 8$; μ – номер фундаментальной функции; C_μ – произвольные постоянные интегрирования.

Коэффициенты $b_{s,\mu,j}^n$ определяем через коэффициенты предыдущего приближения $b_{s,\mu,j}^{n-1}$ по рекуррентным формулам:

$$\mathrm{b_{s,\mu,j}^{\,n}} = \sum_{v=1}^{2} \sum_{i=0}^{3} \sum_{k=0}^{q} a_{v,i,k}^s b_{v,\mu,(j+i-k-3)}^{n-1} \frac{1}{n+j-1} \times$$
$$\times \prod_{v=0}^{k} (n+j-1-\gamma) \tag{20}$$

Частное решение системы (16) запишем так:

$$\mathrm{X_s^*} = \sum_{j=0}^{q} b_{s,j}^{*(0)} \frac{\xi^{j+4}}{(j+4)!} + \sum_{n=1}^{\infty} X_{s,n}^* ; \tag{21}$$

$$X_{s,n}^* = \sum_{j=1}^{\beta_1} b_{s,j}^{*(n)} \frac{\xi^{n+j+3}}{(n+j+3)!} . \tag{22}$$

Здесь $b_{1,j}^{*(0)} = \Phi_k f1$; $b_{2,j}^{*(0)} = 0$; $\beta_1 = q(n+1) + 3n + 1$.

Коэффициенты $b_{s,j}^{*(n)}$ определяем через коэффициенты предыдущего приближения $b_{s,j}^{*(n-1)}$ по рекуррентным формулам:

$$\mathrm{b_{s,j}^{*(n)}} = \sum_{v=1}^{2} \sum_{i=0}^{3} \sum_{k=0}^{q} a_{v,i,k}^s b_{v,(j+i-k-3)}^{*(n-1)} \frac{1}{n+j} \times$$
$$\times \prod_{v=0}^{k} (n+j-\gamma). \tag{23}$$

Постоянные C_{μ}, входящие в общее решение системы (18), находим из граничных условий (10) на поперечных краях, которые в соответствии с физическим содержанием вариационного метода Бубнова- Власова берутся в смягченном интегральном смысле. Не выписывая детально систему уравнений граничных условий для поперечных краев $\xi = 0$; $\xi = 1$, представим ее в виде:

$$\sum_{м=1}^{2}\sum_{ш=0}^{3} \mathrm{A}_{\mathrm{v,i}}^{\mathrm{j}} X_v^i = \Phi_j \qquad (j = 1, 2), \qquad (24)$$

причем $A_{v,i}^{j}$ – коэффициенты уравнений;

Φ_j – свободный член.

В случае изменения функции температуры только по толщине пластины свободный член Φ_j запишем в вид:

$$\Phi_1 = -\frac{21}{(1-\alpha)^4 r^4}\frac{M_{T_1} l^2}{D_1}; \quad \Phi_2 = 0. \qquad (25)$$

Таким образом, в этом случае правая часть уравнения температурного изгиба (6) тождественно равна нулю. Из граничных условий (24), (25) следует, что закон распределения температуры и свойств материала учитывается множителем $\frac{M_{T_1}}{D_1}$. Из этого вытекает, что прогибы и силовые факторы в пластинах с одинаковыми размерами, но не одинаково нагретых по толщине и с разными физико-механическими характеристиками материала будут относиться как величины $\frac{M_{T_1}}{D_1}$, определенные для каждой пластины отдельно. Разница в прогибах учитывается коэффициентом К:

$$K = \left(\frac{M_{T_1}}{D_1}\right)_I : \left(\frac{M_{T_1}}{D_1}\right)_{II}. \qquad (26)$$

Пример.

Рассмотрим влияние зависимости упругих постоянных материала от температуры на величину прогибов трапециевидной пластины, выполненной из теплостойкого органического стекла СТ-1. Зависимость модуля упругости показана на рис.3 [8]. Модуль упругости Е и произведение αЕ на интервале изменения температуры представим степенными полиномами

$$E = \sum_{i=0}^{2} A_i T^i; \qquad \alpha E = \sum_{i=0}^{2} B_i T^I, \qquad (27)$$

где коэффициенты A_i и B_i принимают следующие значения:

$$A_0 = 34{,}59 \bullet 10^4 \ \frac{н}{м^2}; \ A_1 = -1431 \ \frac{н}{м^2 град};$$

$$A_2 = -7{,}65 \ \frac{н}{м^2 град^2};$$

$$B_0 = 25{,}67 \cdot 10^{12} \ \frac{н}{м^2 град};$$

$$B_1 = -60{,}76 \cdot 10^9 \ \frac{н}{м^2 град^2};$$

$$B_2 = -555{,}7 \bullet 10^6 \ \frac{н}{м^2 град^3}. \qquad (28)$$

Рассмотрим два закона изменения температуры по толщине пластины (рис.2):

$$T = T_0 + \frac{z}{h}\Delta T; \qquad (29)$$

$$T = \Delta T\left(\frac{1}{2} + \frac{z}{h}\right)^2. \qquad (30)$$

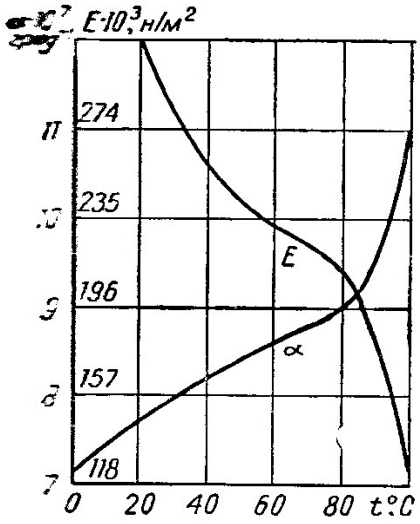


Рис.2. Изменение параметров Е и α в зависимости от температуры.

Закон (29) соответствует стационарному режиму теплопроводности, а (30) является частным случаем нестационарного режима.

Для (29) сравним прогибы, найденные с учетом зависимости упругих постоянных материала от температуры и без учета ее.

Используя формулы (2), (4), (5), при неизменности физико-механических характеристик для обоих законов распределения температуры получаем:

$$\frac{M_{T_1}}{D_1} = \frac{\alpha\Delta T(1+\nu)}{h}. \qquad (31)$$

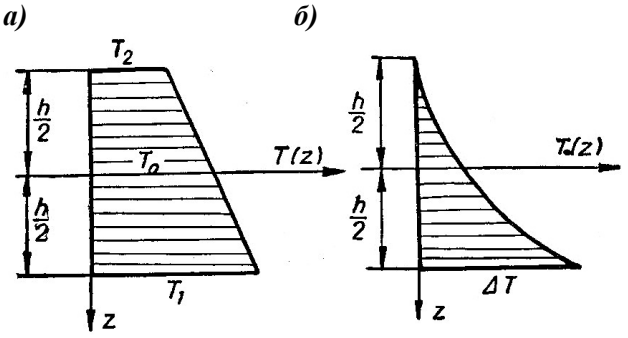


Рис.3. Линейный и нелинейный закон изменения температур по толщине пластины.

Таким образом, прогибы и моменты будут одинаковыми. Для вычисления отношения $\frac{M_{T_1}}{D_1}$ с учетом зависимости физико-механических характеристик материала от температуры выразим температуру в новой системе координат ξ, η, β. По формуле (29) имеем:

$$T = T_0^* + \beta\Delta T\,; \qquad T_0^* = T_0 + \frac{\delta\Delta T}{h}. \tag{32}$$

Для этого закона изменения температуры находим:

$$\delta = h\frac{\left(A_1 + 2A_0T_0\right)\Delta T}{12\left(A_0 + A_1T_0 + A_2T_0^2 + A_2\frac{\Delta T^2}{12}\right)}. \tag{33}$$

Учитывая выражение (33) и (27), по формулам (4), (5) получаем:

$$D_1 = \frac{h^3}{\left(1-\nu^2\right)\Delta T^2}\left[A_0T_0^*\left(T_0^* - 2T_0\right) + A_0\frac{T_4}{3} + \right.$$
$$+ A_1T_0^*\left(T_0^*T_0 - \frac{2}{3}T_4\right) + A_1\frac{T_0T_3}{2} +$$
$$\left. + A_2T_0^*\left(T_0^*\frac{T_4}{3} - T_0T_3\right) + A_2\frac{T_2^2T_4 + 2T_1^3T_0}{5}\right]; \tag{34}$$

$$M_{T_1} = -\frac{h^2}{\left(1-\nu\right)\Delta T}\left[B_3\left(T_0^*T_0 - \frac{T_4}{3}\right) - \right.$$
$$\left. - B_1\left(\frac{T_0^*T_4}{3} - T_0\frac{T_3}{2}\right) + B_2\left(T_0^*T_0\frac{T_3}{2} - \frac{T_2^2T_4 + 2T_1^3T_0}{5}\right)\right] \tag{35}$$

Здесь $T_3 = T^2 + T_2^2$; $T_4 = T_1^2 + T_1T_2 + T_2^2$.

По уравнениям (26), (31), (34), (35) подсчитываем коэффициент K в зависимости от ΔT. На рис.4 (кривая 1) коэффициент K определялся с учетом постоянности коэффициента α в формуле (31), который оставался равным своему значению при температуре 20°С. Для кривой 2 величина α в формуле (31) постоянная по толщине и соответствует средней температуре T_0 для каждого перепада температур ΔT. Результаты для нелинейного закона изменения температуры по толщине (30) показаны на рис.4 штриховыми кривыми 3, 4, причем для кривой 4 коэффициент α в формуле (31) определялся по средней температуре:

$$T_{cp} = \frac{1}{\mathrm{h}}\int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} T dz\,. \tag{36}$$

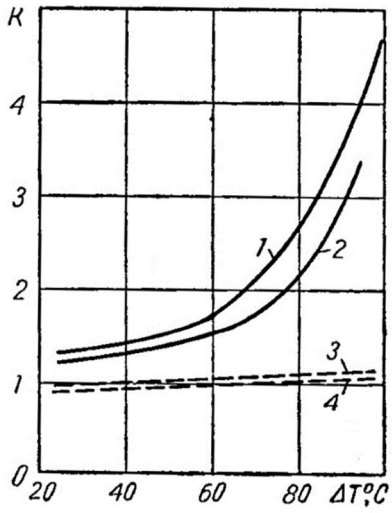


Рис.4. Изменение коэффициента К в зависимости от температуры.

Для нелинейного закона (30) имеем:

$$\delta = h\frac{\left(5A_1 + 4A_2\Delta T\right)\Delta T}{4\left(15A_0 + 5A_1\Delta T + 3A_2\Delta T^2\right)}. \tag{37}$$

Величины D_1 и M_{T_1} соответственно равны:

$$D_1 = \frac{h^3}{\left(1-\nu^2\right)\Delta T}\left[T_0^*\left(A_0 + A_1\frac{\Delta T}{3} + A_2\frac{\Delta T^2}{5}\right) - \right.$$
$$- \sqrt{T_0^*}\sqrt{\Delta T}\left(A_0 + A_1\frac{\Delta T}{2} + A_2\frac{\Delta T^2}{3}\right) +$$
$$\left. + \Delta T\left(\frac{A_0}{3} + A_1\frac{\Delta T}{5} + A_2\frac{\Delta T^2}{7}\right)\right]; \tag{38}$$

$$M_{T_1} = -\frac{h^2}{1-\nu}\left[\sqrt{T_0^*}\sqrt{\Delta T}\left(\frac{B_0}{3} + B_1\frac{\Delta T}{5} + B_2\frac{\Delta T^2}{7}\right) - \right.$$
$$\left. - \frac{\Delta T}{2}\left(\frac{B_0}{2} + B_1\frac{\Delta T}{3} + B_2\frac{\Delta T^2}{4}\right)\right]. \tag{39}$$

Таблица 1. *Результаты расчетов прогибов и силовых факторов для трапециевидных пластин.*

ε	m	γ, *рад*	w	m_1	m_2	m_3
		0,09	20,96584	3,46348	—7,10434	0,00059
		0,18	20,95534	3,44923	—7,11281	0,00124
	0,25	0,35	20,84974	3,34772	—7,15240	0,00293
		0,52	20,58718	3,10319	—7,23655	0,00577
		0,70	20,11174	2,64756	—7,38652	0,01095
		0,09	19,93125	2,72540	—6,80878	0,00285
		0,18	19,90855	2,69106	—6,84961	0,00562
—2,0	0,5	0,35	19,51725	2,29251	—7,03827	0,01260
		0,52	18,66694	1,47942	—7,36155	0,06154
		0,70	17,77129	1,21136	—7,48195	0,09771
		0,09	16,38543	0,10458	—6,07369	—0,00629
		0,18	16,49965	0,14946	—6,22416	—0,03028
	1,0	0,35	26,64043	6,27632	—3,62547	—18,56615
		0,52	20,57934	2,34802	—5,79306	—3,91414
		0,70	19,01177	1,78554	—6,11835	—4,01146
		0,09	20,52301	3,14979	—6,97003	0,00000
		0,18	20,52329	3,15025	—6,97885	0,00000
	0,25	0,35	20,45988	3,08041	—7,01925	0,00000
		0,52	20,22939	2,89262	—7,09893	0,00000
		0,70	19,81332	2,45982	—7,25719	0,00000
		0,09	18,29626	1,53444	—6,41288	0,00000
		0,18	18,34989	1,58831	—6,45408	0,00000
—1,0	0,5	0,35	18,25045	1,41123	—6,63221	0,00000
		0,52	17,64140	1,15520	—6,86412	0,00000
		0,70	16,76379	—0,11451	—7,41317	0,00000
		0,09	11,70591	—3,51994	—5,80756	0,00000
		0,18	12,31913	—3,02014	—5,77144	0,00000
	1,0	0,35	12,65354	—2,89598	—6,18309	0,00000
		0,52	13,44230	—4,10976	—5,30225	0,00000
		0,70	13,01149	—5,81366	—7,99844	0,00000
		0,09	19,90914	2,71051	—6,79867	—0,00145
		0,18	19,93093	2,72505	—6,80913	—0,00288
	0,25	0,35	19,90222	2,68468	—6,85357	—0,00582
		0,52	19,72993	2,50498	—6,94616	—0,00922
		0,70	19,32881	2,11505	—7,11240	—0,01719
		0,09	16,15558	—0,06539	—6,06089	—0,00489
		0,18	16,38355	0,10277	—6,07594	0,00668
—0,5	0,5	0,35	16,49559	0,13182	—6,24064	0,02098
		0,52	15,32062	—0,75065	—6,82527	—1,71643
		0,70	19,25126	1,64061	—5,89244	5,17333
		0,09	7,44803	—6,98882	—6,37854	—0,16362
		0,18	6,87967	—6,88017	—6,95439	—8,35058
	1,0	0,35	24,47346	—2,68845	—3,00077	12,93805
		0,52	23,53893	3,31276	1,06005	21,13099
		0,70	26,33302	5,31896	2,03149	27,66234

На рис.5. представлены значения прогибов в центральном сечении равнобедренной трапециевидной пластины ($\alpha = -1{,}0$), свободно защемленной по непараллельным краям и шарнирно опертой по двум другим в зависимости от $\frac{M_{T_1}}{D_1}$ и соотношения сторон $m = \frac{1}{b_1}$ пластины. По этим графикам можно легко получить значения прогибов точках с координатами $\xi = 0{,}5$; $\eta = \frac{y}{b_1}$ при любом законе изменения температуры по толщине и зависимости характеристик материала от температуры. Для этого требуется предварительно по приведенным формулам вычислить M_{T_1} и D_1.

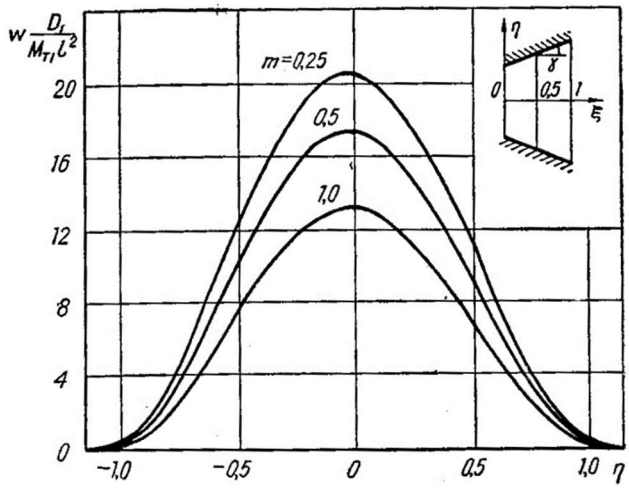


Рис.5. Значения прогибов в центральном сечении трапециевидных пластин.

Программа численной реализации полученного приближенного решения разработана в системе MATHLAB. Величины прогибом и силовых факторов имеют следующий вид:

$$W = w\alpha \frac{\Delta T}{h} l^2 \cdot 10^{-2};$$

$$M_{\xi} = m_1 \alpha \Delta T E h^2 \cdot 10^{-2};$$

$$M_{\eta}^{\eta} = m_2 \alpha \Delta T E h^2 \cdot 10^{-2};$$

$$M_{\xi\eta} = m_3 \alpha \Delta T E h^2 \cdot 10^{-2}.$$

В таблице 1 представлены результаты расчета прогибов и силовых факторов для трапециевидной пластины, свободно защемленной по непараллельным краям и шарнирно опертой по двум другим краям при различных значениях параметров α, m и γ.

Список литературы

1. Мацумото Э., Экня Ц., Инагаки Х., Накаи К. Вычисление изгибных напряжений в скошенных пластинах переменной толщины. – Trans. Japan Soc. Mech. Engrs., vol. 29, N 206, 1963.
2. Matsumoto E.,Sekiya T. Bending stress analysis of swept-back plates of variable thickness. Proc. 12th Japan Nat. Congr. Appl. Mech. – Tokyo, 1963.
3. Gatewood B., Ohanian N. Applied and thermal stress in stiffened nonisotropic plates with variable thickness. – AIAA Bull., vol.2, N3, 1965.
4. Григолюк Э.И., Коненков Ю.К., Кулаков В.М. Задача термоупругости для трапецоидальных пластин. Сб. «Тепловые напряжения в элементах конструкций», Киев, Изд-во «Наукова Думка», 1971.
5. 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.
6. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики. – Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11, с.2039-2043.
7. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений. – Обозрение прикладной и промышленной математики, 2017, том 24, вып.1, с.37-48.
8. Гудимов М.М., Трусова К.И., Касюк В.Д. Теплостойкие органические стекла для остекления скоростных самолетов. – Сб. «Материалы остекления самолетов», М., ОНТИ, 1961.
9. Григолюк Э.И., Попович В.Е., Пухлий В.А. Изгиб сложно нагруженных параллелограммных пластин. Изв. АН СССР, Механика твердого тела, №3, 1972.

Reference

1. Matsumoto E., Eknya C., Inagaki H., Nakai K. Calculation of bending stresses in beveled plates of variable thickness. – Trans. Japan Soc. Mech. Engrs., vol. 29, N 206, 1963.
2. Matsumoto E.,Sekiya T. Bending stress analysis of swept-back plates of variable thickness. Proc. 12th Japan Nat. Congr. Appl. Mech. – Tokyo, 1963.
3. Gatewood B., Ohanian N. Applied and thermal stress in stiffened nonisotropic plates with variable thickness. – AIAA Bull., vol.2, N3, 1965.
4. Grigolyuk E.I., Konenkov Yu.K., Kulakov V.M. Thermoelasticity problem for trapezoidal plates. Sat “Thermal stresses in structural elements”, Kiev, Naukova Dumka Publishing House, 1971.
5. 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 mat. Physics, 1978, Volume 18, No. 5, pp. 1275-1282.

6. Pukhliy V.A. About one approach to solving boundary value problems of mathematical physics. - Differential Equations, 1979, Volume 15, No. 11, pp. 2039-2043.
7. Pukhliy V.A. The solution of initial-boundary value problems of mathematical physics by the modified method of successive approximations. - Review of Applied and Industrial Mathematics, 2017, Volume 24, Issue 1, pp. 37-48.
8. Gudimov M.M., Trusova K.I., Kasyuk V.D. Heat-resistant organic glass for glazing of high-speed aircraft. - Sat “Materials for aircraft glazing”, M., ONTI, 1961.
9. Grigolyuk E.I., Popovich V.E., Pukhliy V.A. Bending of complexly loaded parallelogram plates. Izv. USSR Academy of Sciences, Solid Mechanics, No. 3, 1972.

УДК 621.039.56

Определение влияния стержней регулирования на форму энерговыделения активной зоны реактора на основе статистических методов

С.А. Качур, Э.В. Бутович, А.А. Зозулин
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, kachur_62@mail.ru

Статья поступила 02.10.2019 г.; после доработки 04.10.2019 г.

Аннотация

Рассмотрены особенности применения регрессионного и дискриминантного анализов в алгоритме оптимального управления мощностью ядерного реактора. Рассмотрены примеры решения задачи на базе прикладного статистического пакета MINITAB.

Ключевые слова: реактор, управление энергораспределением, статистические методы, регрессионный анализ, дискриминантный анализ

Determination of the influence of control rods on the form of energy release of the reactor core on the basis of statistical methods

S.A. Kachur, E.V. Butovich, A.A. Zozulin
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, kachur_62@mail.ru

Received 02.10.2019 y.; received in final form 04.10.2019 y.

Abstract

The features of the application of regression and discriminant analyses in the algorithm of optimal control of nuclear reactor power are considered. Examples of solving the problem on the basis of the applied statistical package MINITAB are considered.

Keywords: reactor, power distribution management, statistical methods, regression analysis, discriminant analysis.

Введение

При решении задачи оптимального управления мощностью реактора [1-9] возникает необходимость определения влияния перемещения регулирующих стержней на радиальное и аксиальное распределение мощности.

В предыдущих работах авторов предложен подход с использованием статистических методов для выявления зависимостей между изменением выделяемой в канале мощности и изменением реактивности, вносимой стержнями регулирования.

Рассматривается возможность применения регрессионного анализа для определения коэффициентов связи между изменением вносимой реактивности и мощностью канала, то есть анализ радиального распределения мощности и дискриминантного анализа для определения кривых веса (эффективности) стержней регулирования, то есть анализа аксиального распределения мощности.

В данной статье производится детализация, уточнение предложенных ранее подходов и рассмотрение их использования на примере работы в прикладном статистическом программном пакете MINITAB.

Применение статистических методов направлено на повышение быстродействия при управлении мощностью реактора. Предполагается, что статистическая обработка информации о состоянии активной зоны является предварительным этапом алгоритма управления мощностью.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является определение возможностей регрессионного и дискриминантного анализов для повышения быстродействия алгоритмов оптимального управления мощностью реактора.

Для достижения поставленной цели решаются две задачи:

1) выявление особенностей применение регрессионного анализа при решении задачи управления мощностью реактора не примере использования пакета MINITAB;
2) выявление особенностей применение дискриминантного анализа при решении задачи управления мощностью реактора не примере использования пакета MINITAB.

Применение регрессионного анализа при решении задачи управления мощностью реактора с использованием пакета MINITAB

Определим коэффициенты мощности в канале с вносимой реактивностью.

Изменение мощности в *i*–м канале в линейном приближении можно записать в виде [1]

$$\delta_i Q = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}\delta\rho_j , \qquad i = \overline{1,N} , \tag{1}$$

где n – число перемещаемых стержней регулирования; N – число каналов в реакторе; $\delta\rho_j$ – реактивность, вносимая j–м стержнем регулирования; a_{ij} – коэффициенты связи мощности в i–м канале с реактивностью, вносимой j–м стержнем.

Для простоты изложения рассмотрим в гипотетическом реакторе две группы регулирующих стержней K1, K2 и два канала с мощностями Q1, Q2. Данные и промежуточные расчеты сведены в таблицу MINITABa (рис.1). Столбцы C1 и C2 содержат значения высоты стержней управления и защиты в долях в соответствии с картограммами активной зоны. Информация для столбцов C3, C4 берется с картограмм энерговыделения по объему активной зоны

Пусть максимальная допустимая мощность Q_0 для всех каналов одинакова и составляет 315Вт/см, тогда столбцы C3, C4 содержат значения $Q1_i/ Q_0$, $Q2_i/ Q_0$ соответственно.

При анализе будем рассматривать изменения значений

$DK1=K1_i - K1_{i+1}$,
$DK2=K2_i - K2_{i+1}$,
$DQ1_i= Q1_i/ Q_0 - Q1_{i+1}/ Q_0$,
$DQ2_i= Q2_i/ Q_0 - Q2_{i+1}/ Q_0$,

где i – номер наблюдения, строка в таблице данных.

Data

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
↓	K1	K2	Q1	Q2	DK1	DK2	DQ1	DQ2
1	1.00	0.97	0.965079	0.871429	0.01	0.02	0.016	0.003
2	0.99	0.95	0.949206	0.868254	0.04	0.12	-0.003	0.022
3	0.95	0.87	0.952381	0.846032	0.03	-0.03	-0.010	-0.003
4	0.92	0.90	0.942857	0.849206	0.02	-0.09	0.006	0.019
5	0.90	0.99	0.936508	0.849206	0.02	0.13	0.029	0.035
6	0.88	0.86	0.907937	0.814286	0.01	-0.04	0.003	0.032
7	0.87	0.90	0.904762	0.782540	0.01	0.01	0.022	-0.010
8	0.86	0.89	0.882540	0.792063	-0.13	-0.11	-0.008	-0.057
9	0.99	1.00	0.965079	0.849206	0.02	0.15	0.013	-0.003
10	0.97	0.85	0.952381	0.852381				

Рис.1. Исходные данные для проведения регрессионного анализа

Результаты выполнения регрессионного анализа приведены на рис.2. Определены две двухфакторные регрессионные зависимости изменения мощности от изменения положения стержней регулирования, соответствующие выражению (1).

Таким образом матрица коэффициентов a_{ij} для рассмотренного примера имеет вид

$$A = \begin{bmatrix} 0{,}011 & 0{,}0802 \\ 0{,}45 & 0{,}0027 \end{bmatrix}.$$

Применение дискриминантного анализа при решении задачи управления мощностью реактора с использованием пакета MINITAB

В результате работы оптимального алгоритма управления мощностью реактора должны быть получены значения $\delta\rho_j$ реактивностей, вносимых j–м стержнем регулирования (j=1, 2, …n).

Если принять плотность потока нейтронов [1]

$$\varphi(z) = \varphi_0 \sin(\pi z / H),$$

то можно получить

$$\delta k(z) = \delta k(H) \frac{z}{H}\left[1 - \frac{\sin(2\pi z / H)}{2\pi z / H}\right] \qquad (2)$$

где $\delta k(H)$ – эффективность полностью погруженного стержня;. H – высота активной зоны.

Используя (2), можно получить предварительное значение высоты погружения стержня.

В реальных условиях распределение потока нейтронов по высоте реактора может отличаться от синусоидального, поэтому кривые веса (эффективности) стержней регулирования будут иметь другой вид. Расчет этих функциональных зависимостей требует определенного времени. Поэтому для повышения быстродействия алгоритма управления желательно иметь готовые, ранее определенные зависимости по предыдущим статистическим данным. Выбор из множества возможных функций подходящей для текущего состояния активной зоны возможен на основе дискриминантного анализа.

Предположим, что функции веса стержней регулирования описываются следующей зависимостью

$$\frac{\delta k(z)}{\delta k(H)} = \frac{z}{H}\left[1 - \frac{R1\sin(2\pi z / H) - R2\cos(2\pi z / H)}{(2\pi z / H)}\right] + R3$$

На рис.3 изображены три функции Z1, Z2, Z3 веса стержней при различных значениях коэффициентов R1, R2, R3 и H=8:

1 – R1=1, R2=R3=0;

2 – R1=0.5, R2=R3=0;

3 – R1=1, R2=0.3, R3=0.05.

Session

Regression Analysis

```
The regression equation is
DQ1 = 0.011 DK1 + 0.0802 DK2

Predictor       Coef       StDev          T        P
Noconstant
DK1           0.0112      0.1180       0.09    0.927
DK2          0.08020     0.06150       1.30    0.233

S = 0.01430
Analysis of Variance

Source       DF          SS          MS          F        P
Regression    2   0.0005371   0.0002686       1.31    0.328
Error         7   0.0014309   0.0002044
Total         9   0.0019680

Source       DF      Seq SS
DK1           1   0.0001895
DK2           1   0.0003476

Unusual Observations
Obs       DK1         DQ1         Fit  StDev Fit   Residual    St Resid
  8    -0.130   -0.00800   -0.01028    0.01296    0.00228        0.38 X

X denotes an observation whose X value gives it large influence.
```

Session

Regression Analysis

The regression equation is
DQ2 = 0.450 DK1 + 0.0027 DK2

Predictor	Coef	StDev	T	P
Noconstant				
DK1	0.4503	0.1456	3.09	0.018
DK2	0.00272	0.07588	0.04	0.972

S = 0.01764
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	0.0042914	0.0021457	6.89	0.022
Error	7	0.0021786	0.0003112		
Total	9	0.0064700			

Source	DF	Seq SS
DK1	1	0.0042910
DK2	1	0.0000004

Unusual Observations

Obs	DK1	DQ2	Fit	StDev Fit	Residual	St Resid
8	-0.130	-0.05700	-0.05883	0.01599	0.00183	0.25 X

X denotes an observation whose X value gives it large influence.

Рис. 2. Результаты регрессионного анализа

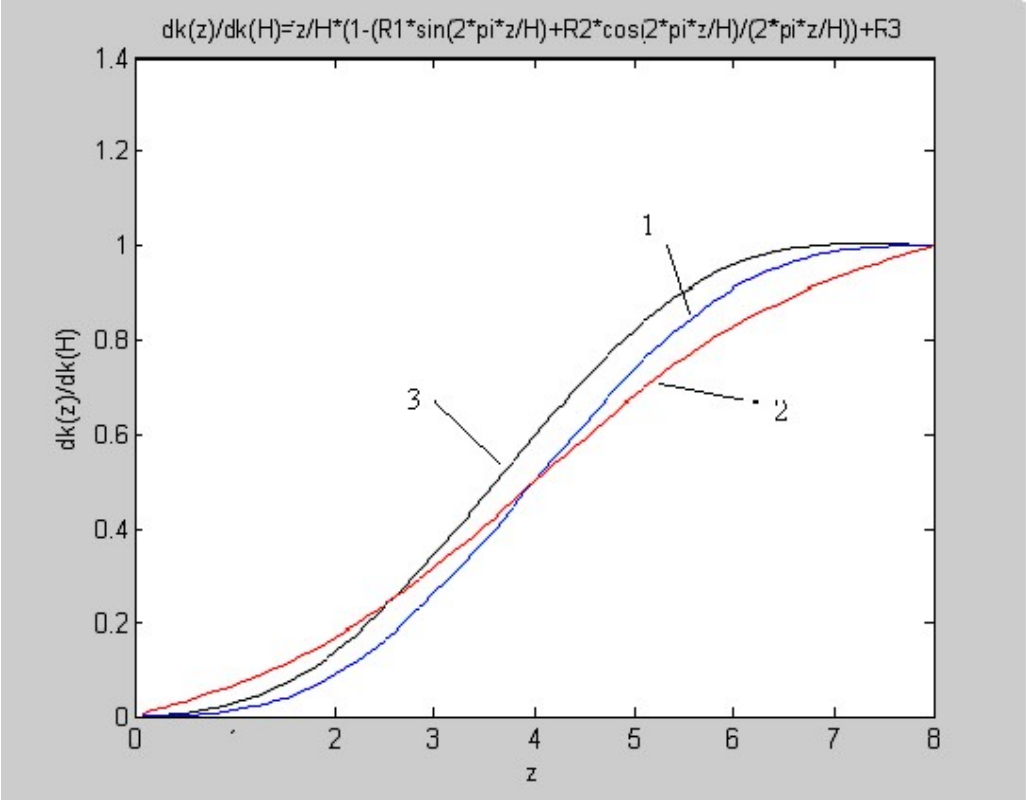


Рис. 3. Возможные кривые веса стержней регулирования.

Для прогнозируемых значений вносимых стержнями реактивности, используя (2), определяется предварительная высота погружения стержня. По рассчитанным значениям мощностей и вносимых реактивностей необходимо определить, каким классом функций описываются кривые веса стержней.

Предположим, что имеется два класса функций: нулевой и первый. Нулевому классу сопоставлена функция Z2, а первому Z3 (рис. 3). Класс описывается множеством наблюдений для выбранных каналов и групп стержней. Допустим, рассматривается одна группа стержней регулирования (K1), описываемая величиной высоты погружения в процентах, и пять каналов с мощностями Q1, Q2, Q3, Q4, Q5. Данные представлены в таблице MINITABa (рис.4). Объем обучающих выборок каждого класса в примере равен 8. В последнюю строку таблицы данных помещается прогнозируемый вектор состояния активной зоны. В системе MINITAB это означает, что необходимо проверить гипотезу о принадлежности прогнозного вектора состояния к последнему (в примере, к первому) классу.

Результаты выполнения дискриминантного анализа приведены на рис. 5. На их основании делается заключение, что прогнозное состояние (строка таблицы 17) принадлежит к нулевому классу. Следовательно, наиболее подходит для описания кривой весов стержней регулирования функция Z2.

Заключение

Рассмотрены особенности применения регрессионного и дискриминантного анализов при решении задачи оптимального управления мощностью ядерного реактора. Приведены примеры использования регрессионного и дискриминантного анализов на базе прикладного статистического пакета MINITAB.

Разработанные подходы позволят снизить временные затраты при определении формы радиального и аксиального распределения мощности в активной зоне реактора.

Исследование направлено на повышение эффективности систем контроля и управления ЯЭУ.

Data

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
↓	CLASS	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	K1
1	0	304	306	306	301	304	100
2	0	299	305	301	298	302	98
3	0	300	298	302	299	297	95
4	0	297	299	299	285	297	93
5	0	295	299	293	299	293	90
6	0	286	288	291	296	291	88
7	0	285	278	275	278	289	87
8	0	278	281	270	281	270	86
9	1	300	299	288	301	304	99
10	1	300	300	268	300	302	97
11	1	290	287	297	299	297	92
12	1	255	299	265	300	278	90
13	1	287	255	291	296	291	88
14	1	272	278	289	278	289	86
15	1	307	291	275	281	260	99
16	1	302	287	265	299	267	87
17	1	295	301	300	299	297	95

Рис.4. Исходные данные для дискриминантного анализа.

Session

Discriminant Analysis

Quadratic Method for Response: CLASS
Predictors: Q1 Q2 Q3 Q4 Q5 K1

Group	0	1
Count	8	9

Summary of Classification

Put into	....True Group....	
Group	0	1
0	8	1
1	0	8
Total N	8	9
N Correct	8	8
Proportion	1.000	0.889

N = 17 N Correct = 16 Proportion Correct = 0.941

From Group	Generalized Squared Distance to Group 0	1
0	16.78	29.29
1	24.51	27.28

Summary of Misclassified Observations

Observation	True Group	Pred Group	Group	Squared Distance	Probability
17 **	1	0	0	19.44	0.997
			1	31.27	0.003

Рис. 5. Результаты выполнения дискриминантного анализа

Список литературы

1. Емельянов И.Я., Ефанов А.И., Константинов Л.В. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.
2. Бахметьев А.М., Самойлов О.Б., Усынов А.М. Методы оценки и обеспечения безопасности ЯЭУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 136с.
3. Крамер Э.У. Ядерные реакторы с кипящей водой. – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1960. – 509с.
4. Качур С.А. Идентификации формы поля тепловыделения в камере смешения ядерного реактора/ С.А. Качур // Пром. теплотехника. – Т.33, №4, 2011. – С.70-76.
5. Качур С.А. Исследование управляемости ядерного реактора на основе анализа функции Бесселя/ С.А. Качур // Сб.науч.тр.СНУЯЭтаП – Вып.2(46). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2013. – с.36-45.
6. Бахмач Е.С. Программно-технические комплексы автоматического регулирования, разгрузки и ограничения мощности реактора и ускоренной предупредительной зашиты: обеспечение и оценка безопасности / Е.С. Бахмач, С.В. Виноградская, К.В. Розен и др. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – №1. – С. 67-90.
7. Еременко В.А. Пути обеспечения безопасного управления атомными энергетическими установками – К.: Техника, 1988. –256с.
8. Мирошник И.В. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами / И.В. Мирошник, В.О. Никифоров, А.Л Фрадков – СПб.: Наука, 2000. –382 с.
9. Качур С.А. Оптимальное управление энергораспределением ядерного реактора на основе методов линейного программирования/ С.А. Качур // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2018. – Т.4. – №1. – С. 18-23.

References

1. Emelyanov I.Ya., Efanov A.I., Konstantsnov L.V. *Naucho-tehnicheskie osnovi upravlenya yadernimi reaktorami* [Scientific and technical control bases by nuclear reactors]. Moscow, Energoizdat, 1981, 360 p.
2. Bahmetev A.M., Samoylov O.B., *Usinov A.M. Metodi ochenki i obespecheniya bezopastnosti YaEU* [Methods of estimation and providing of the NPE safety]. Moscow, Energoizdat, 1988, 136 p.
3. Kramer E. Y. *Yadernie reactori s kipyashey vodoy* [Nuclear reactors with boiling water]. Moscow, Izvo inostr. lit-ri, 1960, 509 p.

4. Kachur S.A. Control by nuclear reactor by means of external electromagnetic radiation**.** *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2011, Vol. 33, No. 4, pp. 70-76.
5. Kachur S.A. *Research of dirigibility of nuclear reactor on the basis of analysis of the Bessel function. Sb. nauch. tr. SNUYaE ta P*, Sevastopol, SNUYaE ta P, 2013, No. 2(46), pp. 36-45.
6. Bahmach E.S., Vinogradskaya S.V., Rozen K.V. Programmatic-technical complexes of automatic control, unloading and limitations of power of reactor and speed-up preventive sewn up: providing and estimation of safety. *Yadernya i radiacionnaya bezopasnost'*.2005, No1, pp.67-90.
7. 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.
8. Miroshnik I.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. *Nelinejnoe i adaptivnoe upravlenie slozhnymi dinamicheskimi sistemami* [Adaptive control by the difficult dynamic systems]. SPb, Nauka, 2000. 382 p.
9. Kachur S.A. Optimum Control by Power Distribution of Nuclear Reactor on the Basis of Methods of the Linear Programming. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii.* 2016, Vol. 4, No 1, pp. 18-23

УДК 620.3

Установка с вертикальным реактором для выращивания наногетероэпитаксиальных структур из жидкой фазы

Т.Ф. Кулюткина, Е.В. Мирошниченко, О.В. Матузаева

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Курчатова, 7 г.Севастополь, 299015, Россия, e-mail e-mail:nanotecsv@gmail.com, evgenijamir@50gmail.com

Статья поступила 24.11.2019 г.

Аннотация

Разработана установка для выращивания многослойных наногетероэпитаксиальных структур методом импульсного охлаждения и нагревания подложки в процессе жидкофазной эпитаксии. Конструктивные возможности установки позволяют получать структуры, содержащие сверхрешетки с массивами квантовых точек, не содержащих «смачивающих» слоев между квантовыми точками, с квантовыми ямами, квантовыми нитями, на основе различных материалов .

Ключевые слова: наногетероэпитаксиальные структуры, p-n переход, массивы квантовых точек, раствор-раслав, квантовые ямы, смачивающие слои

Vertical reactor plant for growing nanoheteroepitaxial structures from the liquid phase

T.F. Kulyutkina , E.V. Miroshnichenko, O.V. Matuzaeva

Sevastopol state university, Kurchatova, 7 Sevastopol, 299015, Russia, e-mail: nanotecsv@gmail.com, evgenijamir@50gmail.com

Received 24.11.2019; received in final form 28.11.2019

Abstract

A plant for growing multilayer nanoheteroepitaxial structures by pulse cooling and heating of the substrate in the process of liquid-phase epitaxy has been developed. The design capabilities of the installation allow to obtain structures containing superlattices with arrays of quantum dots that do not contain "wetting" layers between quantum dots, with quantum wells, quantum filaments, on the basis of various materials.

Keywords: nanoheteroepitaxial structures, p-n transition, quantum dot arrays, solution-melt, quantum wells, wetting layers.

Введение

Полупроводниковые наногетероэпитаксиальные структуры с квантовыми точками (НГЭС КТ) представляют большой интерес в связи с перспективой создания на их основе с эффективностью свыше 50 %, лазеров, светодиодов, полупроводниковых приборов наноэлектроники.

В настоящее время такие гетероструктуры получают из газовой фазы методами молекулярно-лучевой эпитаксией или МОС-гидридной технологией по механизму Странского-Крастанова при использовании подложек с постоянной решетки, существенно отличающейся от постоянной решетки материала квантовой точки[1].

Современное производство НГЭС осуществляется молекулярно-пучковой эпитаксией (MBE) и эпитаксией из газовой фазы, содержащей металлоорганические соединения элементов III группы и гидридов элементов V группы таблицы Менделеева (MOCVD-технология) [2], а также жидкофазной эпитаксией (ЖФЭ) путем

протаскивания подложки над раствором - расплавом при достижении заданной температуры [3].

Перечисленные методы позволяют получать НГЭС с квантовыми ямами (КЯ) и квантовыми нитями (КН) заданными характеристиками. Однако, НГЭС КТ, содержащие p-n переход, получаемые этими методами, характеризуются наличием высокого уровня рекомбинационно-генерационных токов, обусловленных наличием «смачивающих» слоев между КТ [4]. В связи с перспективностью применения таких структур для создания приборов наноэлектроники, проблема получения НГЭС КТ без «смачивающих» слоев является чрезвычайно актуальной.

В настоящей работе рассматривается возможность получения наногетероэпитаксиальных структур с массивами квантовых точек, не содержащих «смачивающих» слоев, так называемых массивов с «идеальными» квантовыми точками (НГЭС ИКТ), на установке с вертикальным реактором из раствора в расплаве легкоплавких металлов методом импульсного охлаждения [5] и нагревания подложки (ИОНП) [6]. В отличие от установок для выращивания НГЭС методами MBE и MOCVD-технологиями, разработанная установка для выращивания многослойных структур в процессе ЖФЭ ИОНП позволяет получать их в условиях близких к равновесным. Это способствует получению НГЭС с низкой концентрацией дефектов.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является представление разработанной установки для выращивания наногетероэпитаксиальных структур из жидкой фазы методом импульсного охлаждения и нагревания подложки, позволяющая выращивать НГЭС без упругонапряженных «смачивающих» слоев между квантовыми точками.

НГЭС КТ представляют собой композит, изготовленный на пластине (подложке) из монокристаллического материала, включающий монокристаллические нанообразования из различных материалов, имеющих в одном, двух или трёх измерениях нанометровые размеры, величина которых должна быть соизмерима с длиной волны де Бройля для электрона λ_e.

Получение многослойной НГЭС КТ осуществляется путем многократного повторения роста сверхрешеток, каждая из которых содержит наноразмерный слой матричного материала и массив КТ, расположенный на его поверхности. Формирование массива КТ по механизму Странского-Крастанова, в начальной стадии, включает образование, так называемого, «смачивающего» слоя, в котором, в связи с различием постоянных решеток материала КТ и матричного материала, образуются периодически изменяющиеся напряжения, с минимумом в местах нониуса совершенства. Дальнейшее формирование квантовых точек происходит в процессе оствальдовского созревания, в котором КТ увеличивают свои размеры. Размер и плотность КТ обусловлены различием постоянных решеток материала КТ и матричного материала, на поверхности которого они формируются [1]. Выращивание НГЭС КТ осуществлялось в процессе жидкофазной эпитаксии (ЖФЭ)методом импульсного охлаждения и нагревания подложки (ИОНП). Суть используемого метода состоит в том, что на тыльную поверхность подложки, которая находится лицевой поверхностью в контакте с насыщенным раствором-расплавом при данной температуре Т, помещается теплопоглотитель, температура которого Тп меньше температуры подложки на величину $\Delta T = T - Tп$. Через некоторое время $\tau \approx 10^{-3} \div 10^{-1}$ сек, определяющее длительность импульса охлаждения подложки, теплопоглотитель принимает температуру подложки. За время τ на лицевой поверхности подложки происходит кристаллизация нанослоя или массива КТ.

В связи с различием постоянных решеток материала КТ и материала, на поверхности которого наращиваются массивы КТ, в начальной стадии формируется сплошной «смачивающий» слой по механизму Странского-Крастанова, с ростом толщины которого в нем возникают периодически механические напряжения с максимумами в середине периода нониуса совершенного строения на гетерогранице. В процессе дальнейшего роста осуществляется формирования КТ в местах минимальных механических напряжений, т.е. в позициях нониуса совершенного строения [5]. Плотность КТ при оптимальных режимах кристаллизации лимитируется в основном периодом нониуса совершенного строения на гетерогранице.

Проведенные исследования на установке с горизонтальным реактором показали возможность получения наноструктур, не содержащих упруго-напряженных «смачивающих» слоев. Однако технологические проблемы, возникающие при использовании горизонтального реактора, не позволяющего удалять остатки раствора-расплава с поверхности выращенного

нанослоя, не дали возможности получать качественные структуры. Переход на вертикальный реактор открывает возможность полного удаления остатков раствора-расплава после каждого выращенного слоя.

Технологическая установка с вертикальным реактором для выращивания наноструктур из растворов в расплаве легкоплавких металлов обеспечивает достижение следующих показателей: оптимальные характеристики технологических процессов формирования квантовых точек высотой 4-5 нм, плотностью 10^{11}см$^{-2}$, спейсерных слоев n и p – типа проводимости толщиной не более 5 нм, буферного слоя толщиной 50 нм и подконтактного слоя толщиной не менее 300 нм. Получение НГЭС ИКТ, содержащих последовательно выращенных не менее 50 массивов КТ, каждый из которых зарощен спейсерными слоями соответственно n и p–типа проводимости. Расчетное время формирования одной структуры составляет не более 30 минут.

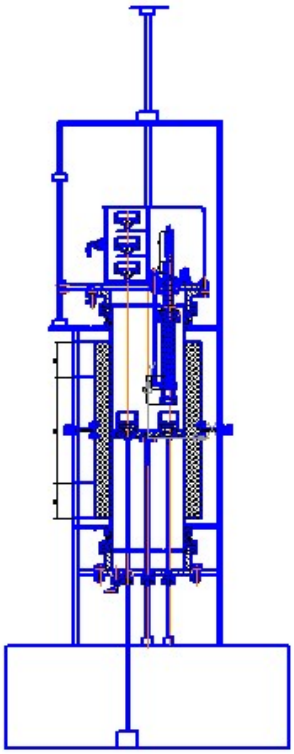


Рис. 1 Схема установки с вертикальным реактором для выращивания НГЭС ИКТ.

Установка содержит вертикальный кварцевый реактор, помещенный в печь сопротивления, верхнюю и нижнюю вакуумноплотные крышки, через которые с помощью манипуляторов осуществляется перемещение теплоносителя для формирования НГЭС КТ, а также многократное перемещение тиглей с растворами-расплавами для контакта с подложкой, на которой последовательно наносятся не менее 50 нанослоев в потоке формингаза при постоянной температуре, с последующими заменами подложек после заверщения на них выращивания НГЭС КТ. Такое конструктивное решение (рис. 1) позволяет осуществлять полное удаление остатков раствора-раслава с поверхности выращенного нанослоя за счет вращения подложки, что улучшает качество выращенных структур, а также позволяет, за счет контакта подложки с теплоносителем, удалять с массивов квантовых точек «смачивающие» слои.

Выводы

Разработанная установка для выращивания наногетероэпитаксиальных структур из жидкой фазы методом импульсного охлаждения и нагревания подложки, обеспечивает выращивание многослойных НГЭС с квантовыми ямами, квантовыми нитями, НГЭС ИКТ. Использование теплонагревателя позволяет выращивать КТ без упруго-напряженных «смачивающих» слоев между КТ. Установка является простой в изготовлении и в обслуживании.

Список литературы

1. Алферов, Ж. И., Леденцов Н.Н., Устинов В.М., и др. // ФТП. – 1998. – Т. 32**.** – № 4.
2. Дубровский В.Г. Теория формирования эпитаксиальных наноструктур. / В. Г. Дубровский. - М. : ФИЗМАТЛИТ. – 2009. – 350 с.
3. Моисеев К.Д., Пархоменко Я. А., Анкудинов А. В.и др. Квантовые точки InSb/InAs, полученные методом жидкофазной эпитаксии // Письма в ЖТФ. - 2007. - Т.33, № 7. – С. 50 – 57.
4. Norman, A.G., Hanna M.C., P. Dippo, D.H. Levi, R.C. Reedy, J.S. Ward, and M.M. Al-Jassim. InGaAs/GaAs QD Superlattices: MOVPE Growth, Structural and Optical Characterization, and Application in Intermediate-Band Solar Cells // *Prepared for the 31IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition Lake Buena Vista, Florida January 3-7, 2005 February 2005. – NREL/CP-520-37405*
5. Марончук, И.Е., Кулюткина Т.Ф., Найденкова М.В. и др. Формирование квантовых точек в процессе жидкофазной эпитаксии методом импульсного охлаждения насыщенного раствора-расплава // Поверхность, рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. – М.: Наука. Интерпериодика. – 2005. – № 12. – С. 97-101.
6. Марончук И.Е., Кулюткина Т.Ф., Марончук И.И. и др. Жидкофазная эпитаксия и свойства

наногетероструктур на основе соединений III-V // Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies 2012, т. 10, № 1, сс. 77—88

Reference

1. Alferov, J. I., Lollipops N. N., Ustinov V. M., et al. / / FTP. - 1998. – Vol. 32. - No. 4.
2. Dubrovsky V. G. the theory of the formation of epitaxial nanostructures. / V. G. Dubrovsky. - M.: FIZMATLIT. - 2009. - 350 PP.
3. Moiseev K. D., Parkhomenko Ya. a., Ankudinov A.V. et al. Quantum dots InSb / InAs obtained by liquid-phase epitaxy. - 2007. - Vol. 33, No. 7. - Pp. 50-57.
4. Norman, A. G., Hanna M. C., P. Dippo, D. H. Levi, R.C. Reedy, J. S. Ward, and M. M. Al Jassim. InGaAs/GaAs QD Superlattices: MOVPE Growth, Structural and Optical Characterization, and Application in Intermediate-Band Solar Cells // Prepared for the 31IEEE Photovoltaics Specialists Conference and Exhibition Lake Buena Vista, Florida January 3-7, 2005 February 2005. – NREL/CP-520-37405
5. Maronchuk, I. E., Kulyutkina T. F., Naydenkova M. V., et al. formation of quantum dots in the process of liquid-phase epitaxy by pulse cooling of saturated solution-melt. Surface, x-ray, synchrotron and neutron studies. - M.: Science. Interperiodica. - 2005. - No. 12. Pp. 97-101.
6. Maronchuk I. E., Kulyutkina T. F., MA-ronchuk I. I. et al. liquid-Phase epitaxy and properties of nanoheterostructures based on compounds III-V / / Nanosystems, nanomaterials, nanotechnologies 2012, vol. 10, No. 1, SS. 77-88.

УДК.621.039.74

Обзор существующих и перспективных способов извлечения радиоактивных отходов, размещающихся в хранилищах «навалом», и опыт использования установок извлечения на ядерных объектах

Н.А. Мороз[1], Е.В. Андреева[2], С.А. Чупрынин[3], Т.Н. Замыслова[4], М.А. Костов[5]
[1, 3, 4, 5]АО «Всероссийский научно-исследовательский институт по эксплуатации атомных станций», ул. Ферганская, 25, г. Москва, 109507, Россия
[2, 3, 4]ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия [1]sv_nata@mail.ru, [2]a_lena60@mail.ru, [3]chuprynin.sevas@mail.ru, [4]Zamytanya@yandex.ru, [5]m_kostov@bk.ru

Статья поступила 12.11.2019 г.; после доработки 14.11.2019 г.

Аннотация
В настоящее время на АЭС Российской Федерации существует серьезная проблема пересмотра всей системы хранения радиоактивных отходов, большая часть которых до сих пор хранится без переработки в хранилищах навалом. В статье приводятся обзор проблем, связанных с хранением и переработкой РАО, которые существуют в настоящее время на ядерных объектах РФ в связи с необходимостью приведения системы обращения с твердыми радиоактивными отходами в соответствие с действующей нормативной документацией.

Ключевые слова: твердые радиоактивные отходы, хранилище «навального типа», установка извлечения, грейфер, защитный кессон, дистанционно управляемый манипулятор.

Prevailing and perspective methods of “in bulk” radioactive waste extraction. Experience of using the extraction systems on the nuclear power objects

N.A. Moroz[1], E.V. Andreyeva[2], S.A. Chuprinin[3], T.N. Zamislova[4], M.A. Kostov[5]
[1, 3, 4, 5]JSC «All-Russian Research Institute for Nuclear Power Plants Operation», 25 Ferganskaya st., Moskow, 109507, Russia
[2, 3, 4]Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia [1]sv_nata@mail.ru, [2]a_lena60@mail.ru, [3]chuprynin.sevas@mail.ru, [4]Zamytanya@yandex.ru, [5]m_kostov@bk.ru

Received 12.11.2019 y.; received in final form 14.11.2019 y.

Abstract
Important problem of modernization of the radioactive waste (RAW) storage system occurs currently on NPP in the Russian Federation. Most of the RAW is still kept in bulk in depositories. In the article the problems of RAW storage and processing occurring nowadays in nuclear power objects of Russia are reviewed. Such report is needed to adduce the system of solid radioactive waste treatment in accordance to present normative documentation.

Key words: solid radioactive waste, “in bulk” depository, extracting equipment, clamshell, protective caisson, distantly controlled manipulators.

Введение

К настоящему моменту на действующих АЭС назрели серьезные проблемы хранения твердых радиоактивных отходов (ТРО). Значительная часть эксплуатационных твердых радиоактивных отходов АЭС до настоящего времени хранится без переработки в связи с отсутствием

эффективных технических средств для их извлечения из отсеков хранилищ. При этом средне- и высокоактивные ТРО находятся в хранилищах в не кондиционированном или частично переработанном виде – «навалом» или под водой. Из-за конструктивных особенностей хранилищ практически исключена возможность контроля текущего состояния ТРО до их извлечения из боксов хранения для последующей переработки. Вместе с тем, в соответствии с НП-020-15 [1], атомные станции должны быть оснащены техническими средствами для осмотра и ревизии ТРО в хранилищах. В соответствии с положениями закона №190-ФЗ от 11.07.2011 г. [2] все радиоактивные отходы перед захоронением должны быть кондиционированы. В 2015 году введен в действие новый нормативный документ НП-093-14 «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» [3], согласно которому кондиционированные РАО должны отвечать общим критериям приемлемости, установленными данным документом. Извлечение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов из хранилищ АЭС, а также создание новых и модификация имеющихся установок обращения с отходами в соответствии с критериями принятия данного вида радиоактивных отходов на хранение и захоронение являются одними из ключевых задач в области обращения с РАО.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – охарактеризовать существующие в настоящее время основные принципы, которые должны быть учтены при извлечении ТРО из хранилищ навального типа.

Для достижения этой цели необходимо:

1) провести сопоставление существующей в настоящее время системы хранения отходов и требований к модернизации хранилищ и установкам по извлечению ТРО;
2) рассмотреть основные технические решения, которые применяются при разработке современных комплексов по извлечению ТРО из хранилищ на различных объектах атомной энергетики в России и за рубежом.

Существующая в настоящее время система хранения ТРО и требования к ее модернизации и установкам извлечения ТРО

Современное состояние системы хранения твердых металлических отходов на отечественных АЭС в настоящее время сводится, главным образом, к размещению (захоронению) в хранилищах различного типа, как правило, без сортировки по видам отходов.

Одной из основных задач и направлений реализации ФЦП [4] по обращению с РАО является модернизация хранилищ РАО и создание новых объектов хранения, обеспечивающих эксплуатацию энергоблоков АЭС, включая продление срока эксплуатации и вывод из эксплуатации энергоблоков. Для решения этой задачи необходимо выполнить большой комплекс работ по извлечению ранее накопленных радиоактивных отходов, включающих металлические радиоактивные отходы, с последующей сортировкой для разделения по уровням активности, типу, способам переработки или вывода из-под радиационного контроля. Разработка оборудование для разгрузки хранилищ «навального» типа является одной из основных задач в ходе реализации ФЦП [4].

В рамках модернизации системы хранения ТРО необходимы также реализация мероприятий по реконструкции хранилищ «навального» типа (после выгрузки) под организованное хранение извлеченных радиоактивных отходов и проведение работ по совершенствованию систем и оборудования для сортировки с целью более тщательной сортировки отходов.

В настоящее время существующие хранилища «навального типа» не соответствуют требованиям современных нормативных документов по ряду параметров, таких как:

– отсутствие средств безопасного извлечения отходов для передачи их на дальнейшую переработку;
– отсутствие возможности определения количественного и качественного состава радиоактивных отходов;
– отсутствие контроля условий хранения (температурного режима, биологической активности, наличия влаги).

Все эти факторы приводят к необходимости создания новых или модернизации старых систем обращения с радиоактивными отходами, одним из элементов которых являются установки по извлечению твердых радиоактивных отходов из хранилищ.

В настоящее время извлечение ТРО из хранилищ «навального» типа производится при помощи грейфера или вручную [5]. На ряде предприятий, в том числе и АЭС, технологии извлечения ТРО из хранилищ не разработаны.

Установки извлечения предназначены для безопасного извлечения отходов из хранилищ, сортировки, в частности, для выделения из всего

объема отходов радиоактивного металла, фрагментации до размеров, позволяющих произвести загрузку в соответствующие контейнеры, отправки металлических и прочих отходов на предприятия по их переработке и дезактивации ячеек хранилища.

При разработке конструкции установки извлечения необходимо, в первую очередь, обеспечивать максимальную защиту персонала от прямого воздействия ионизирующего излучения.

Указанные операции должны выполняться с помощью средств дистанционного управления и контроля. Для предотвращения распространения радиоактивных веществ за пределы мест выполнения работ по извлечению отходов из хранилищ, а также создания благоприятных условий для выполнения работ на открытом воздухе установки извлечения радиоактивных отходов должны размещаться в защитном кессоне.

Внедрение на АЭС установок по разгрузке хранилищ позволит:
- подготовить хранилища «навального» типа к повторному использованию для организованного хранения кондиционированных РАО;
- значительно снизить дозозатраты персонала при разгрузке хранилищ.

Основные технические решения, которые применяются при разработке современных технологий по извлечению ТРО из хранилищ и применение разрабатываемых комплексов извлечения ТРО на различных объектах атомной энергетики в России и за рубежом

Основными функциями установки извлечения радиоактивных отходов должны быть:
- извлечение;
- внутренний осмотр ячеек хранилища для предварительной оценки объема хранящихся в ней РАО, а также вида отходов;
- сортировка, одной из целей которой является выделение из всего объема извлеченных РАО радиоактивного металла, а также оценка его радиационных параметров;
- первичная фрагментация отходов, позволяющая загрузить их в предназначенную для этого транспортную тару;
- радиационный контроль активности отходов, загружаемых в транспортную тару;
- обеспечение системы транспортировки транспортной тары к конечному пользователю;
- обеспечение безопасности персонала на участках обслуживания установки извлечения.

Одной из трудностей данных работ является вероятность наличия в ячейках хранилищ жидкости и иловых отложений. Для их удаления должна быть предусмотрена специальная система, которая также будет удалять ЖРО, образующиеся при проведении дезактивации ячеек после завершения извлечения РАО [6].

Различные информационные источники представляют существующие способы и установки извлечения и переработки радиоактивных отходов из хранилищ «навального» типа.

В разрабатываемых технологиях извлечение накопленных РАО из отсеков заглубленных хранилищ производится с помощью мобильных дистанционно управляемых технических средств: грейферных захватов и манипуляторов.

Извлеченные радиоактивные отходы сортируют, требующие фрагментации, дистанционно фрагментируют и затем размещают в соответствующие контейнеры. Неперерабатываемые (нефрагментируемые) крупногабаритные МРАО из нержавеющей стали – сборки различных типов, толстостенные, перегрузочные контейнеры, насосы 1 контура, др., – поступают на длительное хранение без фрагментации РАО. После извлечения производится осушка освобожденных отсеков при обнаружении в них воды и очистка поверхностей заглубленных отсеков.

Установка для извлечения твердых радиоактивных отходов (ТРО), хранящихся навалом в ячейках хранилищ [7], представляет собой закрытую грузоподъемную конструкцию с автономным вентиляционным блоком для удаления и очистки воздуха из зон извлечения и погрузки. Управление установкой осуществляется дистанционно с переносного или стационарного пультов в ручном или в автоматическом режимах. Расчетные средние производительности установки: при извлечении отходов из ячеек глубиной до 9 м достигают 2,2 $м^3$/час, а из ячеек глубиной до 18 м - 1,3 $м^3$/час. Разработанные конструкции защитной камеры, транспортного контейнера, вентиляционного блока, пультов управления обеспечивают выполнение нормативных требований по защите окружающей среды от радиоактивного загрязнения и радиационной защите персонала при извлечении ТРО.

АО «Альянс-Гамма» разработана установка [8] для извлечения высоко- и среднеактивных радиоактивных отходов, хранящихся «навалом» в хранилищах, в которой в максимальной степени

предусматривается модульное исполнение отдельных узлов для обеспечения универсальности использования на разных типах хранилищ, что существенно расширяет область ее применения.

В состав установки входят:

– модуль для операторов, оборудованный системами управления, видеонаблюдения;
– силовые дистанционно-управляемые механизмы с устройствами для их раскрепления в хранилище ТРО;
– навесное быстросъемное оборудование для дистанционно-управляемых механизмов, предназначенное для рыхления и захвата ТРО, разделки длинномерных ТРО (при необходимости) непосредственно в боксе хранилища и размещения их в оборотные контейнеры, а также захвата и размещения (складирования) упаковок кондиционированных РАО.

Одним из примеров модернизации действующей системы хранения радиоактивных отходов является проведение работ по приведению системы хранения твердых радиоактивных отходов, включающих МРАО, в соответствие с требованиями современной нормативной базы (контейнерное хранение, сортировка извлеченных РАО по активности и типам) на Белоярской АЭС [9].

В настоящее время на площадке Белоярской АЭС хранение твердых радиоактивных отходов в ХСО-1 и ХСО-2 осуществляется навальным способом, без сортировки.

В рамках модернизации системы хранения радиоактивных отходов на Белоярской АЭС ОАО «НИКИЭТ» представлена установка, предназначенная для извлечения РАО из отсеков ХСО-1, производительностью около 1 м^3/ч, обеспечивающая:

– извлечение отходов из центрального отсека хранилища и из боковых пристроек сменными захватами (грейферами) и грузоподъемными механизмами, после предварительного измерения их радиационных параметров при помощи оборудования радиационного контроля;
– определение радиационных параметров извлеченных отходов, и фрагментацию крупных изделий;
– сортировку отходов по категориям активности и типу (металлические и сгораемые);
– упаковку РАО в специальные контейнеры для удаления с площадки Белоярской АЭС и отправки в цех обработки отходов.

ОАО «НИПТБ «Онега» разработан макет мобильного универсального комплекса по извлечению радиоактивных отходов из хранилищ «навального» типа [5].

В проекте разработана быстроразборная конструкция тента-укрытия, обеспечивающего локализацию возможных выбросов радиоактивных аэрозолей и пыли в зоне работ по извлечению, применена система дистанционного управления и видеонаблюдения работой унифицированного сменного навесного оборудования по выгрузке извлеченных радиоактивных материалов, создан специальный модуль управления, а также предусмотрены комфортные условия и необходимая степень биологической защиты обслуживающего персонала от ионизирующего излучения, радиоактивных аэрозолей и пыли в процессе извлечения РАО.

В разработанном комплексе извлечения ТРО максимально используется современное, зарекомендовавшее себя и широко применяемое в мировой практике оборудование, такое как многофункциональная электрогидравлическая машина BROKK 90N, Top Tec 1850E и кран-манипулятор HIAB HS 099E-4HiDuo. Техника компании Brokk AB [10] является специализированной дистанционно-управляемой техникой для осуществления погрузочно-разгрузочных и сортировочных работ с радиоактивными материалами. Она обладает надежной защитой от радиационного и электромагнитного излучений, механических повреждений и радиационной пыли.

В условиях возрастающего объема работ по обращению с ОЯТ и РАО при выводе из эксплуатации и реабилитации объектов ядерного наследия для их обследования и выгрузки хранилищ ТРО ОАО «НИКИЭТ» и НПП «Альфа-Диагностика» были разработаны специализированные инструменты [11]. Их применение обеспечивает радиационную безопасность персонала, улучшает условия труда.

Одной из разработок является комплекс «Поиск-2», позволяющий проводить работы по извлечению ТРО из хранилищ на современном уровне. Комплекс, предназначенный для дистанционного визуального и дозиметрического контроля при проведении работ на глубинах до 8 м, позволяет проводить отбор проб, диагностику состояния хранилищ (температура, давление, газоанализ), извлечение предметов, сбор просыпей; а также механическое воздействие с помощью различных обрабатывающих насадок.

Для проведения работ по извлечению РАО, а также для осуществления визуального и дозиметрического обследования контейнеров, ячеек

хранилищ, извлечения крупных предметов и сбора топливной просыпи, очистки стенок и дна контейнеров и ячеек с одновременным отсосом пыли в специальный сборник, удаляемый дистанционно с помощью пневмопривода, разработан дистанционный инструментальный манипулятор, управление работой которого осуществляется с пульта управления оператором, находящимся вне зоны действия радиации. Использование манипулятора существенно сокращает дозозатраты персонала при выполнении работ по извлечению длинномерных и мелких предметов из технологических шахт.

Разработанный инструмент используется для разборки технологической шахты первой очереди Белоярской АЭС, которая после остановки энергоблока фактически превратились в хранилище РАО, в том числе высокоактивных металлических РАО в виде длинномерных металлических изделий.

Мобильный модуль [12], предлагаемый к использованию при извлечении твердых радиоактивных отходов, включающих металлические РАО, из подземных хранилищ Нововоронежской АЭС, содержит кессон, установленный на колесах на рельсовом пути, с возможностью перемещения по нему вдоль хранилища с расположенным внутри него оборудованием для работы с радиоактивными отходами (грузовая тележка, с установленными на ней контейнеров для РАО и сортировочный стол). Помещения кессона и открытого хранилища изолированы, защищены от обслуживающего персонала и окружающей среды герметичной оболочкой, вентилируются через фильтры. Извлечение РАО из хранилища осуществляет самоходный робот-экскаватор, который измельчает и подает под проем для извлечения содержимое хранилища. Извлекаемые РАО захватываются двухчелюстным грейфером и транспортируются на сортировочный стол Операторы, находящиеся в отдельном помещении для обслуживающего персонала, при помощи герметичных перчаток и инструмента с приборами производят сортировку по заданным отличительным признакам, визуально наблюдая через герметичное окно. Каждый вид отсортированных отходов отправляется в разные контейнеры, размещенные на грузовой тележке.

После заполнения контейнеров грузовая тележка отправляется в транспортный шлюз. «Габаритные» металлические радиоактивные отходы захватываются трехчелюстным грейфером, отсортировываются отдельно и отправляются на дальнейшую переработку. После перегрузки контейнеров дистанционно управляемыми подъемными механизмами на дальнейшую переработку грузовая тележка возвращается на место дальнейшей работы по выгрузке в кессон. Работы по извлечению и сортировке продолжаются до полного извлечения отходов. При использовании модуля соблюдаются требования радиационной безопасности**.**

В роботизированном комплексе извлечения РАО из хранилищ ХЖТО-2 и ХТО-1 Курской АЭС [13], предназначенном для извлечения и сортировки твердых радиоактивных отходов, накопленных за время эксплуатации четырех энергоблоков с реакторами РБМК-1000, реализован комплексный подход к решению проблемы ликвидации потенциально опасного наследия периода начала развития атомной энергетики.

Основные технические и технологические решения для комплекса выбраны по следующим основным критериям:

– применение апробированных технологий и оборудования;
– выбор технологий и оборудования по принципу достаточности для извлечения всех видов РАО, включая металлические;
– соблюдение принципа ALARA;
– возможность учета, мониторинга и паспортизации РАО;
– высокая степень надежности и ремонтопригодности оборудования.

АО «ОДЦ УГР» разработана технология ликвидации непроектных хранилищ, предусматривающая их разбор с последующими этапами переработки РАО [14].

В разработанной технологии применяются дистанционные манипуляции со средне- и высокоактивными МРАО: извлечение, фрагментация, контейнеризация. В течение выполнения работ производится визуализация процесса.

Корпорацией «Укратомприбор» в рамках сотрудничества с ONET Technologies, являющейся поставщиком средств извлечения радиоактивных отходов, представлена установка для РАО из временного хранилища Ровенской АЭС [15].

Установка представляет собой мобильную стальную конструкцию, имеющую смотровые окна для наблюдения за всеми выполняемыми процессами, внутри которой имеется кран, предназначенный для извлечения радиоактивных отходов из ячеек хранилища и их погрузки в специальные контейнеры для транспортирования и хранения. После извлечения МРАО проходят

этапы фрагментации, подготовки и упаковки, которые осуществляются с помощью дистанционно управляемого самоходного манипулятора.

Установка оборудована системой вентиляции; используемые материалы позволяют проводить дезактивацию установки.

Пульт управления и оператор располагаются снаружи конструкции. Оборудование для видеонаблюдения обеспечивает контроль за процессом извлечения радиоактивных отходов как во всех секторах ячейки хранения, так и во всём боксе и позволяет дистанционно проводить все необходимые работы.

Заключение

В основу выбора технических и технологических решений при разработке технологии извлечения РАО заложен принцип минимизации вредного воздействия на персонал ионизирующего излучения, радиоактивных аэрозолей и пыли, минимизация загрязнения окружающей среды в процессе извлечения.

При проектировании установок по извлечению радиоактивных отходов из хранилищ «навального» типа учет проблем их эксплуатации может быть частично решен за счет выбора способа компоновки оборудования.

При разработке проекта должно быть предусмотрено применение технологий и средств технологического оснащения, обеспечивающих безопасность выполнения работ, в том числе радиационную защиту персонала и населения.

Необходима также оценка мощности грузоподъемных механизмов установок извлечения для различных видов хранящихся РАО. Крупногабаритные металлические конструкции требуют мощных и безопасных подъемных механизмов.

Выбор технологий извлечения металлических радиоактивных отходов должен определялся как требованиями обеспечения радиационной безопасности персонала, так и требованиями обеспечения минимального воздействия проводимых работ на окружающую среду.

При извлечении средне- и высокоактивных металлических отходов, их сортировке и фрагментации требуется создание дополнительных защитных экранов для персонала, занятого в работах.

Численность персонала, занятого в работах по извлечению, сортировке, фрагментации, погрузке в транспортные контейнеры и паспортизации извлеченных высоко- и среднеактивных металлических отходов, должна быть минимально необходимой.

В помещениях, насыщенных загрязненным оборудованием, должны применяться специализированные технологии, позволяющие сократить время работы персонала в условиях высоких радиационных полей, снизить их дозовые нагрузки и обеспечить минимальное радиационное воздействие проводимых работ на население и окружающую среду.

При выполнении работ по извлечению металлических радиоактивных отходов из хранилищ «навального» типа целесообразно применение дистанционно управляемых механизмов, операторы которых располагаются на радиационно безопасном расстоянии и управляют этими механизмами, используя мониторы, видеосистемы, что позволяет уменьшить дозовые нагрузки на персонал в 10…100 раз по сравнению с традиционными методами работы.

В качестве базовой концепции в разрабатываемых проектах установок извлечения радиоактивных отходов должен быть принят принцип безопасности при эксплуатации технологического оборудования на всех стадиях работ по извлечению.

Список литературы

1. НП-020-15. Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности.
2. Федеральный закон от 11 июля 2011 года № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
3. НП-093-14. Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения.
4. Рабочая программа по обращению с радиоактивными отходами АЭС АО Концерн «Росэнергоатом» на период с 2016 по 2020г. АСПРГ-76К(01-03)-2015.
5. Куликов К.Н. Опыт разработки и внедрения комплекта оборудования для выгрузки низкоактивных ТРО из хранилищ навального типа Смоленской АЭС / К.Н. Куликов, Ю.С. Журавлев, С.Н. Росляков, А.А. Михеев, С.А. Ерзылев // Труды ОАО «НИПТБ «Онега». Конструкторские разработки [Текст]: сб. научн. тр. / ОАО «НИПТБ «Онега» – Вып. 7 – Северодвинск: 2012. – С. 11 – 16.
6. Нефедов А.С. Установка для извлечения радиоактивных отходов из хранилищ РАО на АЭС / А.С. Нефедов, В.А. Тонких // Ядерна та радіаційна безпека. – Вып. №2(46), 2010. – С. 53 – 56.
7. Шевченко А.И. Установка для извлечения твердых радиоактивных отходов из ячеек хранилищ / А.И. Шевченко // Стратегия развития ядерной энергетики: выбор Украины. Сборник тезисов докладов международной конференции УкрЯО.

Под редакцией академика НАН Украины Вишневского И.Н. и кандидата физ.-мат. наук Трофименко А.П. – Киев, 2001. – с. 18.
8. Опыт создания установок извлечения твердых радиоактивных отходов из хранилищ «навального» типа. Материалы седьмой Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» – МНТК-2010 (Москва, 26–27 мая 2010 г.) [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://algamma.ru/about/massmedia/2012/opyt_sozdaniya_ustanovok_izvlecheniya_tverdyh_radioaktivnyh_othodov_iz_hraniliw_naval_nogo_tipa/.
9. Роменков А.А. Модернизация системы хранения ТРО Белоярской АЭС / А.А. Роменков, М.А. Туктаров, Д.С. Смольников, В.Ф. Росляков, С.И. Щербинин [Электронный ресурс] // Безопасность ядерных технологий и окружающей среды. – Москва, 2011. – Режим доступа: http://www.atomic-energy.ru/articles/2011/10/18/27692.
10. Техника BROKK. Вывод из эксплуатации объектов атомной промышленности [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.brokk.ru/vyvod-iz-ekspluatatsii-obektov-atomnoy-promyshlennosti.html.
11. А.П. Васильев. Специализированный инструмент для дистанционного обращения с ОЯТ и РАО в труднодоступных и опасных местах. Краткий обзор докладов 7-го Всероссийского семинара-совещания «Система государственного учёта и контроля РВ и РАО и обращение с радиоактивными отходами», 20-24 июня 2016 г. Санкт-Петербург [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.atomic-energy.ru/articles/2016/08/23/ 68476.
12. Пат. 2388086 Российская Федерация, МПК G21F9/34. Модуль мобильный для извлечения твердых радиоактивных отходов из хранилища / Мищенко А.М., Мужик В.Н., Гермашов В.Н., Гордиенко В.А.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Атомспецсервис»; заявл. 9.09.2008; опубл. 27.04.2010.
13. Комплекс извлечения РАО из хранилищ ХЖТО-2 и ХТО-1 Курской АЭС. Дезактивация отсеков хранилищ, реконструкция отсеков в ХЖТО-2. Вывод из эксплуатации ХТО-1 [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.nikimtatomstroy.ru/resources/27562b004b0cb3879da2fd13f7f719e3/nikimtatomstroj-kompleks-izvlechenija-RAO.pdf.
14. Технология ликвидации непроектных хранилищ – разбор с последующими этапами переработки РАО [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://fb7923q3.bget.ru/?page_id=441.
15. Установка для извлечения твёрдых радиоактивных отходов из временного хранилища Ровенской АЭС [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.uap.kiev.ua/Projects/RadwastesManipulationEquipment/PlantForExtractionOfRadioactiveWastesFromInterimStorageOfRovnoNPP/.

References

1. NP-020-15. *Sbor, pererabotka, hranenie i kondicionirovanie tverdyh radioaktivnyh othodov* [Collection, processing, storage and conditioning of solid radioactive waste]. Safety Requirements.
2. Federal Law on the 11th of June, 2011, № 190-FZ "*Ob obrashchenii s radioaknivnymi othodami i o vnesenii izmenenij v otdel'nye zakonodatel'nye akty Rossijskoj Federacii*" [Radioactive waste treatment and changes in defined acts of laws in Russian Federation].
3. NP-093-14. *Kritetii priemlemosti radioaktivnyh othodov dlya zahoroneniya* [Criteria of radioactive waste acceptability for dupming].
4. ASPRG-76K(01-03)-2015. *Rabochaya programma po obrashcheniyu s radioaktivnymi othodami AEHS AO Koncern "Rosehnergoatom" na period s 2016 po 2020g.* [Working program on radioactive waste treatment in NPP joint-stock company Concern "Rosenergoatom" for the period 2016-2020 y].
5. Kulikov K.N. *Opyt razrabotki i vnedreniya komplekta oborudovaniya dlya vygruzki nizkoaktivnyh TRO iz hranilishch naval'nogo tipa Smolenskoj AEHS* [The experience of developing and introduction of equipment complex for uploading low-activity solid RAW out of the "in bulk" depositories in Smolensk NPP] / K.N. Kulikov, Y.S. Juravlev, S.N. Roslyakov, A.A. Miheev, S.A. Erzylev // *Proceedings of the OAO "NIPTB "Onega".* Constructing elaborations [Text]: proc. / OAO "NIPTB "Onega" – Iss. 7 – Severodvinsk: 2012. – P. 11 – 16.
6. Nefedov A.S. *Ustanovka dlya izvlecheniya radioaktivnyh othodov iz hranilishch RAO na AEHS* [Equipment for radioactive waste extraction from RAW depositories on the NPP] / A.S. Nefedov, V.A.Tonkih // Nuclear and radioactive safety. – Iss. №2(46), 2010. – P. 53 – 56.
7. Shevchenko A.I. Equipment for solid radioactive extracting from the depository cells / A.I. Shevchenko // Strategy of developing of nuclear power energy production: Ukrainian choice. *Proceedings of the UkrYaO international conference.* Eds. Academic of NAS of Ukraine Vishnevsky I.N. and PhD in phys. and math's Trofimenko A.P. – Kyiv, 2001. – p. 18.
8. *Opyt sozdaniya ustanovok izvlecheniya tverdyh radioaktivnyh othodov iz hranilishch "naval'nogo" tipa. Materialy sed'moj Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii "Bezopasnost', ehfektivnost' i ehkonomika atomnoj ehnergetiki* [The experience of constructing the equipment for solid radioactive waste extracting out of "in bulk" depositories. Materials of the 7th International scientific technical conference "Safety, effectiveness, and economics of nuclear power energy production"] – MNTK-2010 (Moscow, 26-27 May 2010) [Elec-

tronic source] // Available at: http://al-gamma.ru/about/massmedia/2012/opyt_soz-daniya_ustanovok_izvlecheniya_tverdyh_ radioaktivnyh_othodov_iz_hraniliw_naval_nogo _tipa/.

9. Romenkov A.A. *Modernizaciya sistemy hraneniya TRO Beloyarskoj AEHS* [Modernization of the system of solid RAW storage Beloyarsk NPP] / A.A. Romenkov, M.A. Tuktarov, D.S. Smolnikov, V.F. Roslyakov, S.I. Scherbinin [Electronic source] // Safety of nuclear power technologies and environment. – Moscow, 2011. – Available at: http://www.atomic-energy.ru/articles/2011/10/18/27692.
10. *Tehnika BROKK. Vyvod iz ehkspluatacii ob"ektov atomnoj promyshlennosti* [BROKK technology. Implication out of operation of nuclear industry objects] [Electronic source] // Available at: http://www.brokk.ru/vyvod-iz-ekspluatatsii-obektov-atomnoy-promyshlennosti.html.
11. A.P. Vasiljev. *Specializirovannyj instrument dlya distancionnogo obrashcheniya s OYAT i RAO v trudnodostupnyh i opasnyh mestah. Kratkij obzor dokladov 7-go Vserossijskogo seminara-soveshchaniya "Sistema gosudarstvennogo ucheta i kontrolya RV i RAO i obrashchenie s radioaktivnymi othodami"* [Specific instrument for distant operating with PNF (Proceeded Nuclear Fuel) and RAW in difficult to access and dangerous places]. Short review of reports from the 7th All-Russian seminar-meeting "System of state calculation and control of radioactive blow-out and RAW, and operating with radioactive waste", 20-24 June 2016. Saint-Petersburg [Electronic source] // Available at: http://www.atomic-energy.ru/articles/2016/08/23/68476.
12. Pat. 2388086 Russian Federation, MPK G21F9/34. *Modul' mobil'nyj dlya izvlecheniya tverdyh radioaktivnyh othodov iz hranilishcha* [Mobile unit for extracting the solid radioactive waste out of depository] / Mischenko A.M., Mujik V.N., Germashov V.N., Gordienko V.A.; patent owner limited company "Atomspecservis"; rec. 9.09.2008; publ. 27.04.2010.
13. *Kompleks izvlecheniya RAO iz hranilishch HZHTO-2 i HTO-1 Kurskoj AEHS. Dezaktivaciya otsekov hranilishch, rekonstrukciya otsekov v HZHTO-2. Vyvod iz ekspluatacii HTO-1* [Complex of RAW extracting out of depositories HGTO-2 and HTO-1 in Kursk NPP. Inactivation of modules of depositories, reconstruction of the modules to HGTO-2. Implication out of operation HTO-1] [Electronic source] // Available at: http://www.nikimtatomstroy.ru/resources/27562b004b0cb3879da2fd13f7f719e3/nikimtatomstroj-kompleks-izvlechenija-RAO.pdf.
14. *Tehnologiya likvidacii neproektnyh hranilishch – razbor s posleduyushchimi ehtapami pererabotki RAO* [Technology of liquidation of non-designed depositories – dissection with further stages of RAW processing] [Electronic source] // Available at: http://fb7923q3.bget.ru/page_id=441
15. *Ustanovka dlya izvlecheniya tverdyh radioaktivnyh othodov iz vremennogo hranilishcha Rovenskoj AEHS* [Equipment for solid radioactive waste extracting out of temporary depository of Rovno NPP] [Electronic source] // Available at: http://www.uap.kiev.ua/Projects/RadwastesManipulationEquipment/PlantForExtractionOfRadioactive WastesFromInterimStorageOfRovnoNPP/.

УДК 621.039

Термоупругость рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок на основе теории трехслойных конструктивно-ортотропных оболочек

В.А.Пухлий, К.В.Пухлий
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, pu1611@rambler.ru

Статья поступила 30.10.2019 г.; после доработки 05.11.2019 г.

Аннотация

Предложена математическая модель и алгоритм решения задачи термоупругости для рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок с воздушным охлаждением. При расчете НДС лопатка схематизируется как трехслойная конструкция – ортотропная оболочка переменной жесткости, при этом поперечный набор ребер охлаждающих каналов рассматривается как жесткий несжимаемый в поперечном направлении заполнитель. Рассмотрен случай, когда физико-механические характеристики лопаток зависят от температуры. К решению системы дифференциальных уравнений 12-го порядка применяется модифицированный метод последовательных приближений, разработанный проф.В.А.Пухлий и опубликованный им в академической печати.

Ключевые слова: газотурбинные и комбинированные установки, рабочие лопатки, термоупругость, трехслойные ортотропные оболочки, жесткий заполнитель, модифицированный метод последовательных приближений

Thermoelasticity of working blades of gas turbine and combined installations based on the theory of three-layer structural-orthotropic shells

V.A. Pukhliy, K.V. Pukhliy
Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia., pu1611@rambler.ru

Received 30.10.2019 y.; received in final form 05.11.2019 y.

Abstract

A mathematical model and algorithm for solving the thermoelasticity problem for rotor blades of gas-turbine and combined air-cooled plants are proposed. When calculating the VAT, the blade is schematized as a three-layer structure - an orthotropic shell of variable stiffness, while the transverse set of fins of the cooling channels is considered as a rigid, incompressible in the transverse direction, aggregate. The case is considered when the physicomechanical characteristics of the blades depend on temperature. To solve the system of differential equations of the 12th order, a modified method of successive approximations is applied, developed by Prof. V.A. Pukhliy and published by him in the academic press.

Keywords: gas turbine and combined installations, rotor blades, thermoelasticity, three-layer orthotropic shells, rigid aggregate, modified method of successive approximations

Введение

Рабочие лопатки газотурбинных, паротурбинных и комбинированных установок относятся к самым напряженным и ответственным деталям осевых турбомашин, поломка которых может вывести из строя весь агрегат [1-3].

В настоящее время имеется два подхода к решению задач об определении напряженно-деформированного состояния (НДС) таких лопаток. Первый подход основан на представлении рабочей лопатки в виде тонкостенного закрученного стержня.

Методы расчета таких рабочих лопаток осевых турбомашин создавались как продолжение и развитие методов расчета воздушных винтов и рабочих лопаток стационарных паровых турбин, в основе которых лежала классическая теория изогнуто-закрученных стержней Кирхгофа-Клебша.

Усовершенствование методов расчета шло как в общетеоретическом плане, так и по линии учета специфических особенностей лопаток осевых турбомашин: высокие окружные скорости, сложные законы изменения площади сечений по длине лопатки, тонкие профили и т.д. Дальнейшее совершенствование методов расчета рабочих лопаток выявило недостаточность некоторых представлений классической теории стержней.

Второй подход к решению задач расчета рабочих лопаток, при котором используется теория оболочек для анализа поведения лопаток осевых турбомашин, начал применяться сравнительно недавно, причем рассматривались в основном задачи о колебаниях лопаток [4].

Для анализа спектра частот собственных колебаний лопатки использовалась процедура метода Ритца.

В работе [5] исследовалось НДС рабочих лопаток осевых турбомашин на основе теории трехслойных оболочек переменной жесткости [6]. Из вариационного принципа Лагранжа получены уравнения равновесия и естественные граничные условия для лопаток осевых турбомашин.

Решение краевой задачи основано на применении вариационного метода Бубнова-Власова и модифицированного метода последовательных приближений [7-9].

Отметим, что в настоящее время широко применяются численные методы, в частности, метод конечных разностей и метод конечных элементов. Существует значительное количество зарубежных программных продуктов (очень модных и дорогих) типа MSK/NASTRAN, Fluent, Star-CD, Ansys, Flow Vision и др., в которых используются численные методы.

Однако, следует отметить, что при использовании данных продуктов зачастую не удается получить достаточно точные результаты [10].

В современных газотурбинных и комбинированных установок при изготовлении лопаток используются различного рода сплавы, содержащие, как правило, редкоземельные металлы рений (Re) и рутений (Ru). Обширные исследования в этом направлении проводятся во Всероссийском научно-исследовательском институте авиационных материалов (ВИАМ) по повышению температуры рабочего тела и эффективности термодинамического цикла работы газотурбинных установок, оптимизации систем охлаждения, уменьшению веса лопаток и дисков, что напрямую связано с увеличением ресурса работы ГТУ [11-13].

Развитие жаропрочных никелевых сплавов (ЖНС) для литья монокристаллических лопаток ГТУ привело к разработке сплавов 4-го и 5-го поколений, к которым относится рений-содержащие ЖНС, дополнительно легированные рутением (Ru).

Данные сплавы имеют высокие показатели длительной прочности, а также высокую технологичность при направленной кристаллизации, что позволяет использовать их для получения монокристаллических турбинных лопаток с проникающим охлаждением [11-13].

Заметим, что монокристаллические лопатки, т.е. лопатки, изготовленные целиком из одного кристалла, обладают высокими прочностными характеристиками. Так, например, предел прочности такой лопатки $\sigma_{пр} = 120 \div 150$ кгс/мм^2.

Следует отметить, что молибден-рениевые сплавы применяются в конструкциях высокотемпературных ядерных энергетических установок.

Подчеркнем, что существует международный рынок газотурбинных и комбинированных установок, где при изготовлении лопаток используется рений (Re) и рутений (Ru). Это, прежде всего, фирмы «General Electric» (США), «Сименс» (Германия).

В настоящее время в РФ принята государственная программа по строительству и модернизации ТЭС стоимостью порядка 2 трлн. рублей. Фирма «Сименс», которая недавно устроила международный скандал с поставкой 2-х газотурбинных установок для Симферопольской и Балаклавской ТЭС, начала активно искать контакты с Россией, чтобы принять активное участие в этой программе. И хотя в РФ в настоящее время заканчиваются работы по созданию отечественной газотурбинной установки большой мощности, Правительство России, тем не менее, пошло навстречу фирме «Сименс» в этом направлении и в настоящее время ведутся переговоры о совместном производстве большой номенклатуры газотурбинных и комбинированных установок на базе концерна «Силовые машины» (Санкт-Петербург).

При этом фирма «Сименс» согласна передать РФ всю технологическую документацию по газотурбинным установкам и «know-how», в

частности технологию производства высокоэффективных лопаток на основе сплавов с рением (Re) и рутением (Ru).

Следует отметить, что ранее Россия сильно зависела от стран, добывающих рений. В 1992 году было открыто единственное в мире месторождение рения, расположенное в действующем вулкане Кудрявый на острове Итуруп Курильской гряды. По данным ученых ежегодно вулкан Кудрявый выбрасывает в атмосферу свыше 20 тонн минерала рениита (ReS_2).

В настоящей работе рассматривается несвязанная квазистатическая задача термоупругости для рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок.

Изложенный подход может также использоваться и при расчетах НДС рабочих лопаток паротурбинных установок АЭС. Рассматривается высокотемпературный нагрев, когда физико-механические характеристики материала зависят от температуры.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является разработка методов решения задач термоупругости рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок на основе теории трехслойных конструктивно-ортотропных оболочек с учетом зависимости физико-механических характеристик материала лопаток от температуры.

Конструктивное исполнение лопаток газовых турбин и комбинированных установок

В современных газотурбинных установках температура газовых потоков перед лопаткой достигает порядка T = 2000 °C, при этом температура потока на рабочих лопатках составляет до T = 1200 °C. Этому способствует в значительной мере применение редкоземельных элементов рения (Re) и рутения (Ru) при разработке специальных сплавов для рабочих лопаток.

Для снижения уровня температур в газотурбинных и комбинированных установках используются системы охлаждения рабочих лопаток: воздушные и водяные. На рис.1 представлены конструктивные схемы лопаток газовых турбин с воздушным охлаждением [14, 15].

С точки зрения механики конструкционных элементов такую лопатку можно рассматривать как трехслойную ортотропную оболочку переменной жесткости [16], при этом поперечные ребра каналов охлаждения будут выполнять роль ортотропного заполнителя. Приведенные упругие параметры такого заполнителя определяются по методике, изложенной в [17].

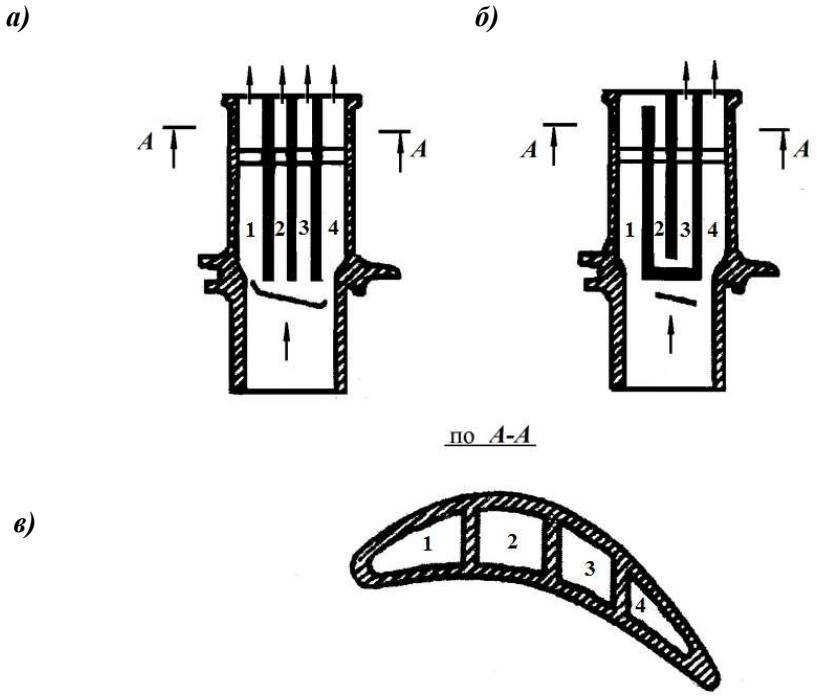


Рис.1. Конструктивные схемы лопаток газовых турбин с воздушным охлаждением: а) с продольными каналами; б) с продольно-возвратными каналами; в) профиль лопатки [14].

Внешняя и внутренняя геометрия трехслойных естественно закрученных лопаток газовых турбин переменной жесткости [18]

На рис.2 приведены геометрические параметры и система координат закрученной лопатки-оболочки. Предполагается, что оболочка образована винтовым движением оси профиля лопатки и поворачивающегося профиля лопатки относительно этой оси на угол φ_0 с некоторой угловой скоростью. Геометрические параметры лопатки задаются следующим образом.

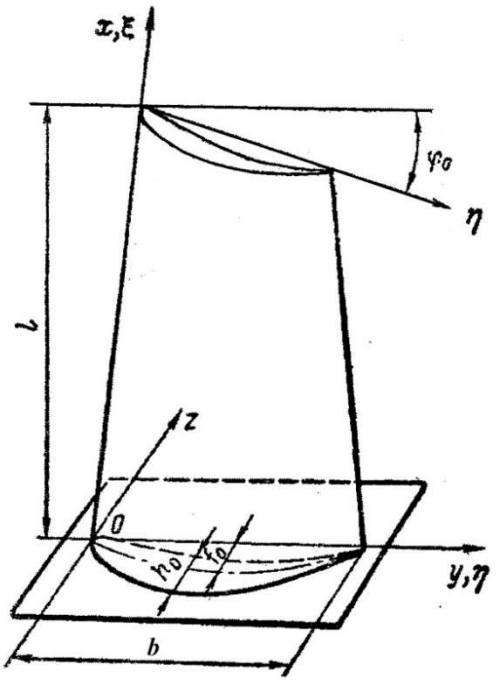


Рис.2. Геометрические параметры и системы координат трехслойной конструктивно-ортотропной лопатки.

А. Законы изменения толщины лопатки и толщины ортотропного заполнителя.

Лопатки газовых турбин и комбинированных установок изготавливаются крыловидного профиля, который задается таблично.

Однако при расчетах необходимо иметь закон изменения профиля в аналитическом виде. При этом, как правило, функция изменения толщины профиля задается с помощью интерполяционных полиномов или рациональных дробей.

Следует заметить, что многочлены и рациональные дроби имеют существенные недостатки как аппарат приближения для функций с не слишком большой гладкостью (именно этим отличаются функции изменения толщин крыловидных профилей осевых турбомашин).

Основной недостаток применения многочленов и рациональных дробей заключается в том, что их поведением в окрестности какой-либо точки определяется поведение в целом. Предварительно проведенные расчеты с использованием интерполяционных многочленов Лагранжа, а также аппроксимации профиля по методу наименьших квадратов показали практическую непригодность таких подходов.

В настоящей статье для задания таблицы изменения толщины профиля в аналитическом виде применяются полиномиальные сплайны, склеенные из кусков многочленов [19]. Принимая кубическую интерполяцию, функции изменения толщины лопатки и толщины заполнителя представим в виде:

$$\mathrm{h}(\xi,\eta)=h_0\lambda_1 t_1(\xi)t_2(\eta),$$
$$h_3(\xi,\eta)=h_3^0\lambda_2 r_1(\xi)r_2(\eta), \qquad (1)$$

где h_0 и h_3^0 – максимальные толщины 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 толщин лопатки и заполнителя по ее длине и по хорде, соответственно задаются в виде:

$$\mathrm{t}_1=\left[1+(\psi_1-1)\xi\right],$$
$$r_1=\left[1+(\psi_2-1)\xi\right],$$
$$t_2=\left[b_{1i}+b_{2i}(\eta-\eta_{i-1})+b_{3i}(\eta-\eta_{i-1})^3+\right.$$
$$\left.+b_{4i}(\eta-\eta_{i-1})^3\right],$$
$$r_2=\left[c_{1i}+c_{2i}(\eta-\eta_{i-1})+c_{3i}(\eta-\eta_{i-1})^2+\right.$$
$$\left.+c_{4i}(\eta-\eta_{i-1})^3\right], \qquad (2)$$

здесь $\psi_1=h_{\text{п}}/h_0$ и $\psi_2=h_3^{\text{п}}/h_3^0$ – отношения толщины лопатки и толщины заполнителя в периферийном сечении к толщине лопатки и толщине заполнителя в корневом сечении соответственно. В формулах для выражения t_2 и r_2 коэффициенты сплайн-многочленов на каждом интервале определяются из условий в узлах.

Б. Уравнение срединной поверхности лопатки

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

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

$f_0, \lambda_3 = l/f_0$ – геометрический параметр лопатки.

Здесь, как и ранее, безразмерные функции f_1 и f_2 характеризуют относительное изменение стрелы изогнутости лопатки по ее длине и по хорде соответственно. Величины a_{ni} (i = 1, 2, 3, 4) являются коэффициентами сплайн-многочленов и определяются на каждом интервале из условий в узлах.

В. Закон закрутки лопатки по ее длине $\varphi = \varphi(\xi)$ может быть произвольным. В ряде случаев можно принять $\varphi = \lambda^{-1}\xi$, где $1/\lambda$ – параметр закрутки, равный φ_0/l (закрутка на единицу длины).

Переходим к рассмотрению геометрических параметров поверхности лопатки. Примем неподвижную систему координат xyz, при этом плоскость $y0z$ совпадает с плоскостью корневого сечения, ось y – с направлением хорды, ось x 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 $\varphi(x) = \lambda^{-1}x$.

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

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

получим формулу для радиус-вектора срединной поверхности лопатки

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

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:

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

и выражения для кривизн:

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

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.

Формулировка задач термоупругости

В общем случае постановка задачи термоупругости заключается в следующем.

Необходимо при заданных механических и тепловых воздействиях определить 16 функций координат x_k и времени t: шесть компонентом тензора напряжения σ_{ij}, шесть компонентов тензора деформации ε_{ij}, три компонента вектора перемещения u_i и температуру T, удовлетворяющих:

– 3-м уравнениям движения

$$\sigma_{ij,j} + F_i = \rho\ddot{u}_i, \tag{6}$$

где σ_{ij} – тензор напряжений; F_i – объемные силы; $\rho\ddot{u}_i$ – силы инерции; ρ – плотность; u_i – вектор перемещений.

Здесь нижний индекс следующий после запятой означает частное дифференцирование по соответствующей координате. Частные производные по времени обозначаются точками сверху.

– 6-ти соотношениям между напряжениями и деформациями

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \left[\lambda\varepsilon_{KK} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T(T - T_0)\right]\delta_{ij}, \tag{7}$$

где $\varepsilon_{KK} = \dfrac{\sigma_{KK}}{3K} + 3\alpha_T(T - T_0)$;

$K = \lambda + \dfrac{2}{3}\mu$, где λ и μ – коэффициенты Ляме при изотермической деформации; K –изотермический модуль объемного расширения; T_0 – температура тела в недеформированном состоянии (T_0 = const); ($T - T_0$) – приращение температуры.

δ_{ij} – символ Кронекера $\delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{при } i \neq j \\ 1 & \text{при } i = j \end{cases}$

Из (7) следуют соотношения между деформациями и напряжениями следующего вида:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{(1+\nu)\sigma_{ij}}{E} - \nu\frac{\sigma_{KK}}{E}\delta_{ij} + \alpha_T(T - T_0)\delta_{ij}; \quad (8)$$

– 6-ти соотношениям между деформациями и перемещениями:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} = \frac{1}{2}\left(u_{i,j} + u_{j,i}\right); \quad (9)$$

– уравнение теплопроводности

$$\left(\lambda_{ij}T_{,i}\right)_{,i} + W_0 = T\dot{S}, \quad (10)$$

где S – объемная плотность энтропии; W_0 – удельная мощность (количество тепла, производимого за единицу времени в единице объема) источников тепла.

$$S = -\frac{1}{2}\frac{\partial\lambda}{\partial T}\varepsilon_{KK}^2 - \frac{\partial\mu}{\partial T}\varepsilon_{ij}\varepsilon_{ij} + \\ + \frac{\partial}{\partial T}\left[(3\lambda + 2\mu)\alpha_T(T - T_0)\right]\varepsilon_{KK} + \int_{T_0}^{T}\frac{C_{\varepsilon=0}}{T}dT. \quad (11)$$

К этим уравнениям (6)-(10) присоединяются начальные и граничные условия.

Следует отметить, что при исследовании термодинамики деформирования кроме плотности внутренней энергии U и плотности энтропии S вводятся следующие термодинамические функции:

– плотность свободной энергии:

$$F = U - TS; \quad (12)$$

– плотность термодинамического потенциала Гиббса [20]:

$$G = F - \sigma_{ij}\varepsilon_{ij}. \quad (13)$$

Подчеркнем, что величины U, F, G – функции состояния. Приращения их при изменении состояния упругого тела представляют собой полные дифференциалы.

Данные функции называются термодинамическими потенциалами.

Исходя из выражения

$$dU = TdS + \sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}, \quad (14)$$

с помощью уравнений (12) и (13) находим:

$$dF = -SdT + \sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}; \quad (15)$$

$$dG = -SdT - \varepsilon_{ij}d\sigma_{ij}. \quad (16)$$

Так как *dU*, *dF* и *dG* – полные дифференциалы, то

$$\frac{\partial U}{\partial S} = T, \quad \frac{\partial U}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial F}{\partial T} = -S, \quad \frac{\partial F}{\partial \varepsilon_{ij}} = \sigma_{ij}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial G}{\partial T} = -S, \quad \frac{\partial G}{\partial \sigma_{ij}} = -\varepsilon_{ij}. \quad (19)$$

Напомним физический смысл введенных термодинамических потенциалов. Как видно из уравнений (14) и (15), при изотермическом процессе ($dT = 0$) элементарная работа деформации $\sigma_{ij}d\varepsilon_{ij}$ совершается за счет возрастания свободной энергии подобно тому, как при адиабатическом процессе ($dS = 0$) эта работа происходит за счет возрастания внутренней энергии.

Из уравнения (16) следует, что возрастание дополнительной работы деформации $\varepsilon_{ij}d\sigma_{ij}$ при $dT = 0$ соответствует убыли термодинамического потенциала Гиббса [20].

Каждый термодинамический потенциал является функцией 7 из 14 термодинамических параметров σ_{ij}, ε_{ij}, T, S ($i, j = 1, 2, 3$): $U = U(\varepsilon_{ij}, S)$, $F = F(\varepsilon_{ij}, T)$, $G = G(\sigma_{ij}, T)$. Остальные параметры находятся с помощью частных производных (17)-(19). Если известен хотя бы один термодинамический потенциал, можно определить остальные.

Для установления соотношений между напряжениями и деформациями необходимо составить выражение для плотности свободной энергии F как функции компонентов тензора деформации ε_{ij} и температуры T.

Начальные условия обычно задаются в виде распределений компонентов вектора перемещения u_i и температуры T во всей области V упругого тела:

$$u_i = g_i(x_k), \quad u_i = h_i(x_k), \quad T = f(x_k) \quad (20)$$

при $t = 0$.

Здесь и дальше обозначения $g_i(x_k)$, $h_i(x_k)$, $f(x_k)$ означают функции всех координат x_k (k = 1, 2, 3) в рассматриваемой области.

Граничные условия на поверхности Ω упругого тела, ограничивающей его объем V, складываются из механических и тепловых условий.

Механические граничные условия задаются либо в перемещениях

$$u_i = g_i(x_k, t) \text{ при } t > 0, \quad (21)$$

либо в напряжениях

$$\sigma_{ij}n_j = f_i(x_k, t) \text{ при } t > 0, \quad (22)$$

где f_i – компоненты вектора поверхности силы; n_i – компоненты единичного вектора внешней нормали к поверхности Ω.

В качестве теплового граничного условия применяется одно из граничных условий теории теплопроводности. Механические и тепловые граничные условия могут быть также смешанными. На одной части поверхности механические граничные условия могут быть заданы в перемещениях (21), а на другой – в напряжениях (22).

Тепловое граничное условие на одной части поверхности тела задается, например, температурой:

$$\mathrm{T}(\mathrm{x}_{\mathrm{K}},t)=f(x_K,t), \qquad (23)$$

где x_K – точка поверхности тела; $f(x_K,t)$ – заданная функция.

На другой частоте поверхности тела граничные условия могут быть заданы законом конвективного теплообмена с окружающей средой:

$$-\lambda_{\mathrm{q}}\frac{\partial T(x_K,t)}{\partial n}=\alpha\left[T(x_{K,t})-v\right], \qquad (24)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, который зависит от термических и физических характеристик поверхности тела и окружающей среды.

Система уравнений (6), (7) или (8)– (10) при указанных начальных граничных условиях описывает связанную нелинейную задачу термоупругости.

При $\frac{\mathrm{T}-\mathrm{T}_0}{\mathrm{T}_0}<<1$ значения упругих и термических коэффициентов и удельных теплоемкостей предполагаются постоянными, вместо уравнения (10) применяется уравнение теплопроводности:

$$\lambda_{\mathrm{q}}T_{,ii}+w_0=c_\varepsilon\dot{T}+(3\lambda+2\mu)\alpha_T T_0\dot{\varepsilon}_{KK}. \qquad (25)$$

Здесь линеаризуем второй член в правой части уравнения (25), полагая $T\approx T_0$.

Таким образом мы рассматриваем случай малого термического возмущения, когда $\frac{\mathrm{T}-\mathrm{T}_0}{\mathrm{T}_0}<<1$. При этом упругие коэффициенты λ, μ, термические коэффициенты α_T, λ_{q} и удельные теплоемкости $c_{\sigma=0}$ и $c_{\varepsilon=0}$ можно считать не зависящими от температуры. Вместо этих теплоемкостей можно рассматривать удельную теплоемкость соответственно при постоянном тензоре напряжения c_σ и при постоянном тензоре деформации c_ε.

В результате связанная задача термоупругости становится линейной.

В работе [21] доказывается, что для области V, свободной от объемных сил и источников тепла, решение системы уравнений (6)–(9) при начальных и граничных условиях, заданных через перемещения и температуру, является единственным. Это доказательство можно обобщить и на другие механические и тепловые воздействия и граничные условия.

Составим для этой задачи уравнения движения в перемещениях. Выражая в уравнениях (6) напряжения через деформации по формуле (7) и учитывая, что члены, содержащие $\varepsilon_{\mathrm{kk}}$ и T, сохраняются только при $i=j$, получаем:

$$2\mu\varepsilon_{ij,j}+\lambda\varepsilon_{kk,i}+F_i-(3\lambda+2\mu)\alpha_T(T-T_0)_{,i}-\rho\ddot{u}_i=0 \qquad (26)$$

В этом уравнении деформации заменяем перемещениями по формуле (19). Заменяя j немым индексом k и учитывая, что $\mathrm{u}_{\mathrm{k,ik}}=u_{k,ki}$, находим:

$$\mu u_{i,kk}+(\lambda+\mu)u_{k,ki}+F_i-$$
$$-(3\lambda+2\mu)\alpha_T(T-T_0)_{,i}-\rho\ddot{u}_i=0. \qquad (27)$$

Три уравнения (9) совместно с четвертым уравнением (25) при определенных начальных и граничных условиях описывают изменение в пространстве и во времени поля деформации и температурного поля. Представим эти уравнения в векторной форме:

$$\mu\nabla^2\vec{\mathrm{u}}+(\lambda+\mu)\,grad\ \mathrm{div}\,\vec{\mathrm{u}}+\vec{\mathrm{F}}-$$
$$-(3\lambda+2\mu)\alpha_T\,grad\,(T-T_0)-\rho\ddot{\vec{u}}=0. \qquad (28)$$

$$\nabla^2T+\frac{w_0}{\lambda_q}-\frac{1}{a}\dot{T}-\frac{(3\lambda+2\mu)\alpha_T T_0}{\lambda_{\mathrm{q}}}div\,\vec{\mathrm{u}}=0. \qquad (29)$$

где $a=\frac{\lambda_q}{c_\varepsilon}$ - коэффициент температуропроводности.

Классификация задач термоупругости

А. ***Термоупругая деформация тела, возникающая от нестационарных механических и тепловых воздействий, сопровождается обратным эффектом – изменением его температурного поля.***

Задача термоупругости, в которой учитывается указанный эффект, называется связанной динамической задачей термоупругости, или связанной задачей термоупругости.

Постановка связанной задачи термоупругости рассмотрена ранее. Система уравнений, описывающая эту задачу, содержит уравнение теплопроводности (10), которое в общем случае является нелинейным.

При $\frac{\mathrm{T}-\mathrm{T}_0}{\mathrm{T}_0}<<1$ уравнение теплопроводности линеаризуется и линейная связанная задача термоупругости сводится к решению системы уравнений (28) и (29).

Деформация упругого тела от механических и тепловых воздействий вызывает малое изменение его температуры $T - T_0$, а поэтому учет эффекта связанности при обычных условиях теплообмена имеет значение не столько для задач о тепловых напряжениях, сколько для задач о термоупругом рассеянии энергии.

В задачах, в которых термическое возмущение упругого тела вызывается одной только деформацией от нестационарных механических воздействий, процесс деформирования обычно предполагается адиабатическим.

При такой деформации приращение температуры $\mathrm{T} - \mathrm{T}_0$ определяется следующим выражением:

$$T - T_0 = -\frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha_T T_0}{c_\varepsilon} \operatorname{div} \vec{u} . \qquad (30)$$

Подставляя это выражение в уравнение (28), получаем уравнение динамической задачи теории упругости в перемещениях:

$$\mu\nabla^2\vec{u} + (\lambda_s + \mu)\, grad \operatorname{div} \vec{u} + \vec{F} - \rho\ddot{\vec{u}} = 0, \qquad (31)$$

где λ_s – адиабатический коэффициент Ламе, определяемый следующим выражением:

$$\lambda_s = \lambda + \frac{(3\lambda + 2\mu)^2 \alpha_T^2 T_0}{c_\varepsilon} . \qquad (32)$$

Отметим, что второй коэффициент Ляме μ при адиабатической деформации не изменяется.

Если механические воздействия отсутствуют, а тепловые воздействия медленно изменяются во времени, то в уравнении (5.22) можно пренебречь инерционным членом - $\rho\ddot{\vec{u}}$.

Применяя при $\vec{F} = 0$ и $-\rho\ddot{\vec{u}} = 0$ оператор *div* к обеим частям этого уравнения и учитывая, что *div* grad $= \nabla^2$, после интегрирования получаем:

$$div\, \vec{u} = \frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha_T}{\lambda + 2\mu}(T - T_0) + \varphi(x_k), \qquad (33)$$

где $\varphi(x_k)$ – гармоническая функция координат x_k; ∇^2 – оператор Лапласа.

Подставляя выражение (33) в уравнение (29), находим уравнение теплопроводности в виде:

$$\nabla^2 \mathrm{T} + \frac{\mathrm{w}_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a}(1 + \varepsilon)T = 0, \qquad (34)$$

где

$$\varepsilon = \frac{(3\lambda + 2\mu)^2 \alpha_T^2 T_0}{(\lambda + 2\mu)c_\varepsilon} . \qquad (35)$$

Б. ***Задача термоупругости, описываемая уравнением (31) без инерционного члена – $\rho\ddot{\vec{v}}$ и уравнением (34), называется связанной квазистатической задачей термоупругости.***

В случае адиабатического процесса деформирования определяем решение уравнения (31) для вектора перемещения $\vec{u}$ независимо от уравнения теплопроводности, а в случае медленного изменения тепловых воздействий находим решение уравнения теплопроводности (34) независимо от уравнения для вектора перемещения.

При резко нестационарных тепловых воздействиях в уравнении (28) при $\vec{F} = 0$ сохраняется член $-\rho\ddot{\vec{u}}$, но при $\varepsilon<<1$ в уравнении (29) не учитывается член механической связи – $\frac{(3\lambda + 2\mu)\alpha_T T_0}{\lambda_q} div\, \vec{u}$.

В. ***Задача термоупругости, описываемая двумя уравнениями:***

$$\mu\nabla^2\vec{u} + (\lambda + \mu)\mathbf{grad\, div}\, \vec{u} - (3\lambda + 2\mu)\alpha_T \mathbf{grad}(T - T_0) - \rho\ddot{\vec{u}} = 0, \qquad (36)$$

$$\nabla^2 T + \frac{w_0}{\lambda_q} - \frac{1}{a} T = 0, \qquad (37)$$

называется несвязанной динамической задачей термоупругости, или просто динамической задачей термоупругости.

При существенном приращении температуры $T - T_0$ коэффициенты λ, μ, α_T в соотношениях (7) являются функциями T, а следовательно, и функциями координат x_k и времени t. Учитывая это и выполняя преобразования, аналогичные проведенным в предыдущем разделе, находим для такой задачи следующие уравнения движения в перемещениях:

$$\mu u_{i,kk} + (\lambda + \mu)u_{k,ki} + \mu_{,k}(u_{i,k} + u_{k,i}) + \lambda_{,i} u_{k,k} - [(3\lambda + 2\mu)\alpha_T (T - T_0)]_{,i} - \rho\ddot{u}_i = 0 . \qquad (38)$$

Вместо этих трех скалярных уравнений можно записать одно векторное в виде:

$$\mu\nabla^2\vec{u} + (\lambda + \mu) grad \operatorname{div} \vec{u} + 2\operatorname{grad}\mu \cdot \Pi_\varepsilon + grad\, \lambda \operatorname{div} \vec{u} - grad[(3\lambda + 2\mu)\alpha_T \operatorname{grad}(T - T_0)] - \rho\ddot{\vec{u}} = 0, \qquad (39)$$

где $grad\, \mu \cdot \Pi_\varepsilon$ – скалярное произведение тензора деформации Π_ε на вектор $\operatorname{grad}\mu$ [22].

Если учесть зависимость λ_q от температуры, то уравнение теплопроводности становится нелинейным.

Г. ***Задача термоупругости, в которой не учитываются член*** $\frac{(3\lambda+2\mu)\alpha_T T_0}{\lambda_q}\operatorname{div}\vec{u}$ ***в уравнении (29) и член -*** $\rho\ddot{\vec{u}}$ ***в уравнении (28), называется нествязанной квазистатической задачей термоупругости, или квазистатической задачей термоупругости, или квазистатической задачей термоупругости.***

При стационарном температурном поле задача термоупругости является статической.

Уравнения термоупругости трехслойных конструктивно-ортотропных оболочек с несжимаемым заполнителем

В работе [16] были получены уравнения трехслойных оболочек переменной жесткости с жестким заполнителем при конечных прогибах, когда все три слоя имеют разные толщины и различные механические характеристики материалов.

При построении теории приняты следующие гипотезы [23]: 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.

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): $h=h(x_1,x_2)$ – толщина оболочки; $h_k=h_k(x_1,x_2)$ – толщина слоев (k = 1, 2, 3).

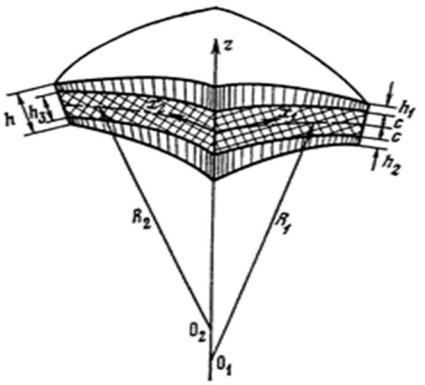


Рис.3. Элемент трехслойной оболочки переменной толщины.

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

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

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

$$v=v_1+\left(z-\frac{c+h_1}{2}\right)w_{,2}; \qquad (40)$$

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

$$u=\frac{u_1+u_2}{2}-\frac{h_1-h_2}{4}w_{,1}+$$
$$+\frac{z}{c}\left(u_1-u_2-\frac{h_1+h_2}{2}w_{,1}\right);$$
$$v=\frac{v_1+v_2}{2}-\frac{h_1-h_2}{4}w_{,2}+$$
$$+\frac{z}{c}\left(v_1-v_2-\frac{h_1+h_2}{2}w_{,2}\right); \qquad (41)$$

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

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

$$v=v_2+\left(z+\frac{c+h_2}{2}\right)w_{,2}. \qquad (42)$$

Здесь u и v – соответствующие переменной вдоль осей x_i (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 – пе-

ремещения точек срединной поверхности верхнего и нижнего несущих слоев вдоль осей x_1, x_2 В формулах (40)-(42), как и в дальнейшем, нижний индекс i, следующий после запятой, означает частное дифференцирование по координате x_i.

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

– в несущих слоях:

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

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

$$\tau_{12} = G_{12}\gamma_{12}; \qquad (43)$$

– в заполнителе:

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

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

$$\tau_{12} = G_{12}^*\gamma_{12}; \quad \tau_{1z} = G_{13}^*\gamma_{1z}; \quad \tau_{2z} = G_{23}^*\gamma_{2z}. \qquad (44)$$

В выражениях (11)-(12) предполагалось, 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:

$$E_1\mu_{21} = E_2\mu_{12}; \quad E_1^*\mu_{21}^* = E_2^*\mu_{12}^*. \qquad (45)$$

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

$$\varepsilon_1 = u_{,1} - \frac{w}{R_1} + \frac{1}{2}w_{,1}^2; \; \varepsilon_2 = u_2 - \frac{w}{R_2} - \frac{1}{2}w_{,2}^2;$$

$$\gamma_{12} = \mathrm{v}_{,1} + u_{,2} + w_{,1}w_{,2}; \qquad \gamma_{1z} = u_{,z} - w_{,1};$$

$$\gamma_{2z} = \mathrm{v}_{,z} - w_{,2}. \qquad (46)$$

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

Введем удельные усилия и моменты:

$$N_{11} = N_{11}^1 + N_{11}^2 + N_{11}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\sigma_1 dz + \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\sigma_1 dz + \int_{-c/2}^{c/2}\sigma_1 dz;$$

$$N_{22} = N_{22}^1 + N_{22}^2 + N_{22}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\sigma_2 dz + \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\sigma_2 dz + \int_{-c/2}^{c/2}\sigma_2 dz;$$

$$N_{12} = N_{12}^1 + N_{12}^2 + N_{12}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\tau_{12} dz + \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\tau_{12} dz + \int_{-c/2}^{c/2}\tau_{12} dz;$$

$$M_{11} = M_{11}^1 + M_{11}^2 + M_{11}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\sigma_1 z dz - \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\sigma_1 z dz - \int_{-c/2}^{c/2}\sigma_1 z dz; \qquad (47)$$

$$M_{22} = M_{22}^1 + M_{22}^2 + M_{22}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\sigma_2 z dz - \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\sigma_2 z dz - \int_{-c/2}^{c/2}\sigma_2 z dz;$$

$$M_{12} = M_{12}^1 + M_{12}^2 + M_{12}^3 =$$
$$= \int_{c/2}^{c/2+h_1}\tau_{12} z dz + \int_{-c/2-h_2}^{-c/2}\tau_{12} z dz + \int_{-c/2}^{c/2}\tau_{12} z dz.$$

Здесь верхние индексы относятся к соответствующим слоям лопатки.

Введем обозначения:

$$u_\alpha = \frac{u_1 + u_2}{2}; \qquad \mathrm{v}_\alpha = \frac{\mathrm{v}_1 + \mathrm{v}_2}{2};$$

$$u_\beta = \frac{u_1 - u_2}{2}; \qquad \mathrm{v}_\beta = \frac{\mathrm{v}_1 - \mathrm{v}_2}{2};$$

$$h = 2h_3 + h_1 + h_2. \qquad (48)$$

Подставляя в формулы (15) выражения для напряжений (11)-(12) с учетом (8)-(10) и (14), получим выражения для удельных усилий N_{11}, N_{22}, N_{12} и удельных изгибающих и крутящих моментов - M_{11}, M_{22}, M_{12} [16]:

$$N_{11} = B_{11}\left[u_{1,1} + \mu_{21}\mathrm{v}_{1,2} + \frac{1}{2}(w_{,1}^2 + \mu_{21}w_{,2}^2) - w\left(\frac{1}{R_1} + \mu_{21}\frac{1}{R_2}\right)\right] +$$
$$+ B_{12}\left[u_{2,1} + \mu_{21}\mathrm{v}_{2,2} + \frac{1}{2}(w_{,1}^2 + \mu_{21}w_{,2}^2) - w\left(\frac{1}{R_1} + \mu_{21}\frac{1}{R_2}\right)\right] +$$
$$+ B_1^*\left[\frac{u_{1,1} + u_{2,1}}{2} + \mu_{21}^*\frac{\mathrm{v}_{1,2} - \mathrm{v}_{2,2}}{2} - \frac{h_1 - h_2}{4}(w_{,11} + \mu_{21}^*w_{,22}) -\right.$$
$$- \frac{h_{1,1} - h_{2,1}}{4}w_{,1} - \mu_{21}^*\frac{h_{1,2} - h_{2,2}}{4}w_{,2} + \frac{1}{2}(w_{,1}^2 + \mu_{21}^*w_{,2}^2) -$$
$$\left. - w\left(\frac{1}{R_1} + \mu_{21}^*\frac{1}{R_2}\right)\right] - f_1; \qquad (49)$$

$$N_{22} = B_{21}\left[\nu_{1,2} + \mu_{12}u_{1,1} + \frac{1}{2}(w_{,2}^2 + \mu_{12}w_{,1}^2) - w\left(\frac{1}{R_2} + \mu_{12}\frac{1}{R_1}\right)\right] +$$
$$+ B_{22}\left[\nu_{2,2} + \mu_{12}u_{2,1} + \frac{1}{2}(w_{,2}^2 + \mu_{12}w_{,1}^2) - w\left(\frac{1}{R_2} + \mu_{12}\frac{1}{R_1}\right)\right] +$$
$$+ B_2^*\left[\frac{\nu_{1,2} + \nu_{2,2}}{2} + \nu_{12}^* \frac{u_{1,1} + u_{2,1}}{2} - \frac{h_1 - h_2}{4}(w_{,22} + \mu_{12}^* w_{,11}) - \right.$$
$$\left. - w\left(\frac{1}{R_2} + \mu_{12}^*\frac{1}{R_1}\right)\right] - f_2; \qquad (50)$$

$$N_{12} = B_{31}(\nu_{1,1} + u_{1,2} + w_{,1}w_{,2}) +$$
$$+ B_{32}(\nu_{2,1} + u_{2,2} + w_{,1}w_{,2}) +$$
$$+ B_3^*\left(\frac{u_{1,2} + u_{2,2}}{2} + \frac{v_{1,1} + v_{2,1}}{2} - \frac{h_1 - h_2}{2} w_{,12} + \right.$$
$$\left. + w_{,1}w_{,2} - \frac{h_{1,2} - h_{2,2}}{4} w_{,1} - \frac{h_{1,1} - h_{2,1}}{4} w_{,2}\right); \qquad (51)$$

$$M_{11} = -B_{11}\frac{h_1 + h_3}{2}\left[u_{1,1} + \mu_{21}\nu_{1,2} + \frac{1}{2}\left(w_{,1}^2 + \mu_{21}w_{,2}^2\right) - \right.$$
$$\left. - \left(R_1^{-1} + \mu_{21}R_2^{-1}\right)w - \frac{h_{1,1} + h_{3,1}}{2} w_{,1} - \mu_{21}\frac{h_{1,2} + h_{3,2}}{2} w_{,2}\right] +$$
$$+ B_{12}\frac{h_2 + h_3}{2}\left[u_{2,1} + \mu_{21}\nu_{2,2} + \frac{1}{2}\left(w_{,1}^2 + \mu_{21}w_{,2}^2\right) - \right.$$
$$\left. - \left(R_1^{-1} + \mu_{21}R_2^{-1}\right)w - \frac{h_{2,1} + h_{3,1}}{2} w_{,1} - \mu_{21}\frac{h_{2,2} + h_{3,2}}{2} w_{,2}\right] -$$
$$- (D_{11} + D_{12})(w_{,11} + \mu_{21}w_{,22}) -$$
$$- \frac{D_1^*}{h_3}\left[(u_{1,1} - u_{2,1}) + \mu_{21}^*(\nu_{1,2} - \nu_{2,2}) - \right.$$
$$- \frac{h_1 + h_2}{2}(w_{,11} + \mu_{21}^* w_{,22}) - \frac{h_{1,1} + h_{2,1}}{2} w_{,1} -$$
$$\left. - \mu_{21}^* \frac{h_{1,2} + h_{2,2}}{2} w_{,2}\right] - D_1^*\left[\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1} \times \right.$$
$$\times\left(u_1 + u_2 - \frac{h_1 + h_2}{2} w_{,1}\right) +$$
$$\left. + \mu_{21}^*\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,2}\left(\nu_1 - \nu_2 - \frac{h_1 + h_2}{2} w_{,2}\right)\right] + f_3; \qquad (52)$$

$$M_{22} = -B_{21}\frac{h_1 + h_3}{2}\left[\nu_{1,2} + \mu_{12}u_{1,1} + \frac{1}{2}\left(w_{,2}^2 + \mu_{12}w_{,1}^2\right) - \right.$$
$$\left. - \left(R_2^{-1} + \mu_{12}R_1^{-1}\right) - \frac{h_{1,2} + h_{3,2}}{2} w_{,2} - \mu_{12}\frac{h_{1,1} + h_{3,1}}{2} w_{,1}\right] +$$
$$+ B_{22}\frac{h_2 + h_3}{2}\left[\nu_{2,2} + \mu_{12}u_{2,1} + \frac{1}{2}(w_{,2}^2 + \mu_{12}w_{,1}^2) - \right.$$
$$\left. - \left(R_2^{-1} + \mu_{12}R_1^{-1}\right)w - \frac{h_{2,2} + h_{3,2}}{2} w_{,2} - \mu_{12}\frac{h_{2,1} + h_{3,1}}{2} w_{,1}\right] -$$
$$- (D_{21} + D_{22})(w_{,22} + \mu_{12}w_{,11}) - \frac{D_2^*}{h_3}\left[(\nu_{1,2} - \nu_{2,2}) + \right.$$
$$+ \mu_{12}^*(u_{1,1} + u_{2,1}) - \frac{h_1 + h_2}{2}\left(w_{,22} + \mu_{12}^* w_{,11}\right) - \frac{h_{1,2} + h_{2,2}}{2} w_{,2} -$$
$$\left. - \mu_{12}^* \frac{h_{1,1} + h_{2,1}}{2} w_{,1}\right] - D_2^*\left[\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,2}\left(\nu_1 - \nu_2 - \frac{h_1 + h_2}{2} w_{,2}\right) + \right.$$
$$\left. + \mu_{12}^*\left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1}\left(u_1 - u_2 - \frac{h_1 + h_2}{2} w_{,1}\right)\right] + f_4; \qquad (53)$$

$$M_{12} = -B_{31}\frac{h_1 + h_3}{2}\left(u_{1,2} + \nu_{1,1} - \frac{h_{1,1} + h_{3,1}}{2} w_{,2} - \right.$$
$$\left. - \frac{h_{1,2} + h_{3,2}}{2} w_{,1} + w_{,1}w_{,2}\right) + B_{32}\frac{h_2 + h_3}{2}\left(u_{2,2} + \nu_{2,1} - \right.$$
$$\left. - \frac{h_{2.1} + h_{3,1}}{2} w_{,2} - \frac{h_{2,2} + h_{3,2}}{2} w_{,1} + w_{,1}w_{,2}\right) -$$
$$- (D_{31} + D_{32})w_{,12} - \frac{1}{2h_3} D_3^*\left[(u_{1,2} - u_{2,2}) + (\nu_{1,1} + \nu_{2,1}) - \right.$$
$$- (h_1 + h_2)w_{,12} - \frac{h_{1,1} + h_{2,1}}{2} w_{,2} - \frac{h_{1,2} + h_{2,2}}{2} w_{,1} +$$
$$+ \left(\frac{1}{h_3}\right)_{,1}\left(\nu_1 - \nu_2 - \frac{h_1 + h_2}{2} w_{,2}\right) +$$
$$\left. + \left(\frac{1}{h_3}\right)_{,2}\left(u_1 - u_2 - \frac{h_1 + h_2}{2} w_{,1}\right)\right]. \qquad (54)$$

Здесь:

$$B_{11} = \frac{E_1 h_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}; \quad B_{12} = \frac{E_1 h_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}};$$
$$B_1^* = \frac{E_1^* h_3}{1 - \mu_{12}^*\mu_{21}^*};$$
$$B_{21} = \frac{E_2 h_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}}; \quad B_{22} = \frac{E_2 h_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}};$$
$$B_2^* = \frac{E_2^* h_3}{1 - \mu_{12}^*\mu_{21}^*};$$
$$B_{31} = G_{12}h_1; \qquad B_{32} = G_{12}h_2;$$
$$B_3^* = G_{12}^* h_3;$$

$$D_{11}=\frac{E_1h_1^3}{12(1-\mu_{12}\mu_{21})};\quad D_{21}=\frac{E\ h_1^3}{12(1-\mu_{12}\mu_{21})};$$
$$D_{31}=\frac{G_{12}h_1^3}{6};$$
$$D_{12}=\frac{E_1h_2^3}{12(1-\mu_{12}\mu_{21})};\quad D_{22}=\frac{E_2h_2^3}{12(1-\mu_{12}\mu_{21})};$$
$$D_{11}=\frac{G_{12}h_2^3}{6};$$
$$D_1^*=\frac{E_1^*h_3^3}{12(1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*)};\ D_2^*=\frac{E_2^*h_3^3}{12(1-\mu_{12}^*\mu_{21}^*)};$$
$$D_3^*=\frac{G_{12}^*h_3^3}{6}. \qquad (55)$$

Выражения для функций температуры записываются в виде:

$$\begin{aligned}
&f_1=B_{11}(m_{11}+\mu_{21}m_{21})+B_{12}(m'_{12}+\mu_{21}m_{22})+\\
&+B_1^*(m_1^*+\mu_{21}^*m_2^*);\\
&f_2=B_{21}(m_{21}+\mu_{12}m_{11})+B_{22}(m_2+\mu_{12}m'_{12})+\\
&+B_2^*(m_2^*+\mu_{12}^*m_1^*);\\
&f_3=D_{11}(n_{11}+\mu_{21}n_{21})+D_{12}(n_{12}+\mu_{21}n_{22})+\\
&+D_1^*(n_1^*+\mu_{21}^*n_2^*);\\
&f_4=D_{21}(n_{21}+\mu_{12}n_{11})+D_{22}(n_{22}+\mu_{12}n_{12})+\\
&+D_2^*(n_2^*+\mu_{12}^*n_1^*),
\end{aligned} \qquad (56)$$

где

$$m_{11}=\frac{1}{h_1}\int_{h_3/2}^{h_3/2+h_1}\alpha_1 T dz;\qquad m'_{12}=\frac{1}{h_2}\int_{-c/2-h_2}^{h_3/2}\alpha_1 T dz;$$
$$m_1^*=\frac{1}{h_3}\int_{-h_3/2}^{h_3/2}\alpha_1^* T dz;$$
$$m_{21}=\frac{1}{h_1}\int_{h_3/2}^{h_3/2+h_1}\alpha_2 T dz;\qquad m_{22}=\frac{1}{h_2}\int_{-h_3/2-h_2}^{-h_3/2}\alpha_2 T dz;$$
$$m_2^*=\frac{1}{h_3}\int_{-h_3/2}^{h_3/2}\alpha_2^* T dz;$$
$$n_{11}=\frac{12}{h_1^3}\int_{h_3/2}^{h_3/2+h_1}\alpha_1 T z dz;\qquad n_{12}=\frac{12}{h_2^3}\int_{-h_3/2-h_2}^{-h_3/2}\alpha_2 T z dz;$$
$$n_1^*=\frac{12}{h_3^3}\int_{-h_3/2}^{h_3/2}\alpha_1^* T z dz;$$
$$n_{21}=\frac{12}{h_1^3}\int_{h_3/2}^{h_3/2+h_1}\alpha_2 T z dz;\qquad n_{22}=\frac{12}{h_2^3}\int_{-h_3/2-h_2}^{-h_3/2}\alpha_2 T z dz;$$
$$n_2^*=\frac{12}{h_3^3}\int_{-h_3/2}^{h_3/2}\alpha_2^* T z dz. \qquad (57)$$

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

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

$$-\delta\Pi+\delta A_1+\delta A_2=0, \qquad (58)$$

где $\delta\Pi$ – 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 [16]:

$$\begin{aligned}
\delta\Pi=\iint_\Omega\Big\{&(N_{11,1}+N_{12,2}+p_1)\delta u_\alpha+\left(N_{22,2}+N_{12,1}\right)\delta v_\alpha+\\
&+\left[m_{1,1}+m_{12,1}-\frac{4}{h_3}G_{13}^*\left(u_\beta-\frac{h}{4}w_{,1}\right)\right]\delta u_\beta+\\
&+\left[m_{2,2}+m_{12,1}-\frac{4}{h_3}G_{23}^*(v_\beta-\frac{h}{4}w_{,2})\right]\delta v_\beta+\left[\left(M_{11}+m_1^*\right)_{,11}+\right.\\
&+(M_{22}+m_2^*)_{,22}+2(M_{12}+m_{12}^*)_{,12}++k_{11}N_{11}+k_{22}N_{22}-\\
&-2k_{12}N_{12}++(N_{11}w_{,1})_{,1}+(N_{22}w_{,2})_{,2}+(N_{12}w_{,2})_{,1}+\\
&+(N_{12}w_{,1})_{,2}-p_1w_{,1}-\frac{h}{h_3}G_{13}^*\left(u_\beta-\frac{h}{4}w_{,1}\right)_{,1}-\\
&\left.-\frac{h}{h_3}G_{23}^*\left(v_\beta-\frac{h}{4}w_{,2}\right)_{,2}+q\right]\delta w\Big\}dx_1dx_2+\int_0^{l_1}\Big\{N_{12}\delta u_\alpha+\\
&+N_{22}\delta v_\alpha+m_2\delta v_\beta+m_{12}\delta u_\beta-(M_{22}+m_2^*)\delta w_{,2}+\\
&+\left[(M_{22}+m_2^*)_{,2}+2(M_{12}+m_{12}^*)_{,1}+N_{22}w_{,2}+\right.\\
&\left.+N_{12}w_{,1}-\frac{h}{h_3}G_{23}^*\left(v_\beta-\frac{h}{4}w_{,2}\right)\right]\delta w\Big\}\Big|_0^{l_2}dx_1+\\
&+\int_0^{l_2}\Big\{N_{11}\delta u_\alpha+N_{12}\delta v_\alpha+m_1\delta u_\beta+m_{12}\delta v_\beta-\\
&-(M_{11}+m_1^*)\delta w_{,1}+\left[(M_{11}+m_1^*)_{,1}+2(M_{12}+m_{12}^*)_{,2}+\right.\\
&+N_{11}w_{,1}+N_{12}w_{,2}-\\
&\left.-\frac{h}{h_3}G_{13}^*\left(u_\alpha-\frac{h}{4}w_{,1}\right)\right]\delta w\Big\}\Big|_0^{l_1}dx_2-2(M_{12}+m_{12}^*)\delta w\Big|_0^{l_1}\Big|_0^{l_2}
\end{aligned} \qquad (59)$$

Здесь p_1, q – компоненты нагрузки в направлении осей x_1, z соответственно. Выпишем выражение для p_1, q следуя [32]. Если площадь поперечного сечения лопатки F постоянная по ее длине, тогда величина центробежной силы равна:

$$p_1 = \rho\omega^2 F \frac{R_2^2 - R_1^2}{2},$$

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 [32]:

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

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:

$$\begin{aligned}
m_1 &= N_{11}^1 - N_{11}^2 - \frac{2}{h_3}M_{11}^3;\\
m_2 &= N_{22}^1 - N_{22}^2 - \frac{2}{h_3}M_{22}^3;\\
m_{12} &= N_{12}^1 - N_{12}^2 - \frac{2}{h_3}M_{12}^3;\\
m_1^* &= \frac{h_1+h_3}{2}N_{11}^1 - \frac{h_2+h_3}{2}N_{11}^2 +\\
&+ \frac{h_1-h_2}{2}N_{11}^3 - \frac{h}{2h_3}M_{11}^3.
\end{aligned} \qquad (60)$$

$$\begin{aligned}
m_2^* &= \frac{h_1+h_3}{2}N_{22}^1 - \frac{h_2+h_3}{2}N_{22}^2 +\\
&+ \frac{h_1-h_2}{2}N_{22}^3 - \frac{h}{2h_3}M_{22}^3;\\
m_{12}^* &= \frac{h_1+h_3}{2}N_{12}^1 - \frac{h_2+h_3}{2}N_{12}^2 +\\
&+ \frac{h_1-h_2}{2}N_{12}^3 - \frac{h}{2h_3}M_{12}^3.
\end{aligned} \qquad (61)$$

Первый интеграл в выражении (59) доставляет дифференциальные уравнения задачи, второй и третий – граничные условия.

Выпишем уравнения равновесия:

$$N_{11,1} + N_{12,2} = -p_1; \qquad N_{22,2} + N_{12,1} = 0; \qquad (62)$$

$$m_{1,1} + m_{12,2} - \frac{4}{h_3}G_{13}^*\left(u_\beta - \frac{h}{4}w_{,1}\right) = 0; \qquad (63)$$

$$m_{2,2} + m_{12,1} - \frac{4}{h_3}G_{23}^*\left(v_\beta - \frac{h}{4}w_{,2}\right) = 0; \qquad (64)$$

$$\begin{aligned}
&\left(M_{11} - \frac{h_1-h_2}{4}N_{11}\right)_{,11} + \left(M_{22} + \frac{h_1-h_2}{4}N_{22}\right)_{,22} +\\
&+ 2\left(M_{12} - \frac{h_1-h_2}{4}N_{12}\right)_{,12} + N_{11}(w_{,11} + R_1^{-1}) +\\
&+ N_{22}(w_{,22} + R_2^{-1}) +\\
&+ 2N_{12}w_{,12} - p_1 w_{,1} + q = 0.
\end{aligned} \qquad (65)$$

При этом последнее уравнение было получено с учетом уравнений (62)-(64).

Подставляя в уравнения (62)-(64) выражения (60), (61) и (49)-(54), получим систему пяти уравнений в перемещениях 12-го порядка для трехслойных ортотропных пологих оболочек переменной жесткости при конечных смещениях относительно функций w, u_1, u_2, v_1, v_2. В общем случае уравнения имеют весьма сложную структуру даже в линейном варианте. В ряде случаев возможно упрощение исходных уравнений.

Расчет трехслойной конструктивно-ортотропной лопатки газотурбинной установки при воздействии стационарного температурного поля

В соответствии с ранее изложенной классификацией рассмотрим несвязанную статическую задачу термоупругости для рабочей лопатки (рис.1) в линейной постановке. Однако отметим, что в общем случае при таких высоких уровнях температур, воздействующих на лопатки газотурбинных установок (T=1200ºC), необходимо рассматривать связанную квазистатическую задачу термоупругости, при которой решаются совместно уравнения теплопроводности (34) и уравнения динамической задачи теории упругости (31).

Рассматривая условия высокотемпературного нагрева физико-механические характеристики материала лопатки будем считать зависящими от температуры:

$$E(T) = E(\xi,\eta,\beta), \quad \alpha(T) = \alpha(\xi,\eta,\beta), \quad \mu(T) = \mu(\xi,\eta,\beta). \qquad (66)$$

Температурное поле представим в виде:

$$T(\xi,\eta,\beta) = T(\beta)f(\xi,\eta). \qquad (67)$$

где $T(\beta)$ – функция изменения температуры по толщине лопатки; $f(\xi,\eta)$ – безразмерная функция изменения температуры в срединной поверхности лопатки.

Рассмотрим температурное поле следующего вида (рис.4):

$$T = T_0^* + \beta\Delta T\,; \qquad T_0^* = T_0 + \frac{z_0\Delta T}{h}\,;$$

$$T_0 = \frac{T_1 + T_2}{2}\,; \qquad \Delta T = T_1 - T_2\,. \quad (68)$$

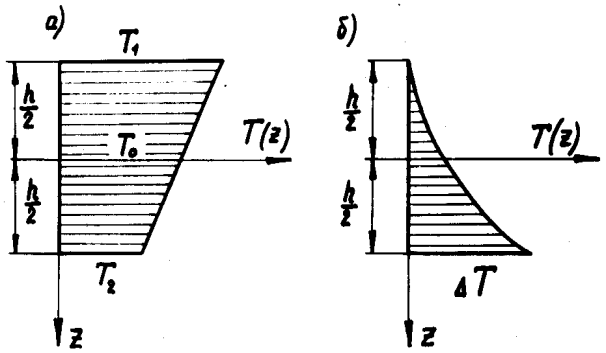


Рис.4. Линейный и нелинейный законы распределения температуры по толщине лопатки.

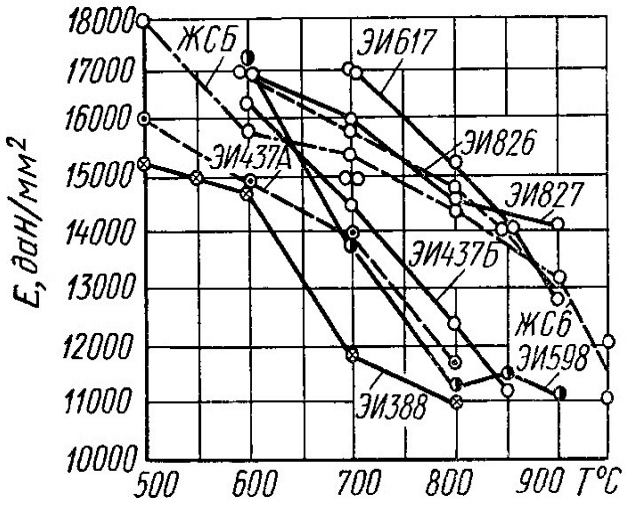
На рис.4 представлен линейный закон распределения температуры по толщине лопатки (рис.4, *а*) и нелинейный закон (рис.4, *б*), например, квадратичный:

$$\mathrm{T} = \Delta\mathrm{T}\left(\frac{1}{2} + \frac{\beta}{h}\right)^2. \quad (69)$$

Закон (68) соответствует стационарному режиму теплопроводности, а (69) является частным случаем нестационарного режима.

Приведем, зависимости модуля упругости – Е и коэффициента линейного удлинения – α от температуры для сплавов ЖНС, использующихся при изготовлении лопаток [32].

а)



б)

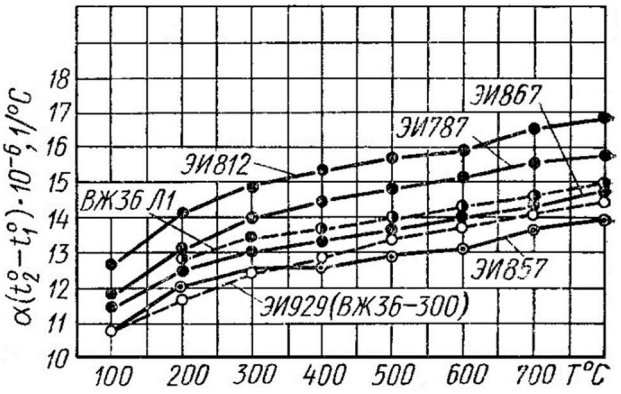


Рис.5. Зависимости модуля упругости Е и коэффициента линейного расширения α для сплавов (ЖНС): а) $E = E(T)$; б) $\alpha = \alpha(T)$ [32].

Естественно, что при решении краевых задач для сплавов ВИАМ с рением (Re) и рутением (Ru) эти зависимости будут другие.

Проведем расчет напряженно-деформированного состояния трапециевидной трехслойной лопатки (рис. 2). Лопатка представляет собой пологую цилиндрическую оболочку переменной толщины (в направлении координаты η), при этом внешние ортотропные слои имеют постоянную толщину.

Функции изменения общей толщины лопатки по ее длине – $\mathrm{h}(\xi,\eta)$ и толщины заполнителя – $h_3(\eta)$ представляются в виде выражений (1)-(2). С учетом вышесказанного получим:

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

$$D_{12,1} = D_{22,1} = D_{32,1} = D_{11,1} = D_{21} = D_{31,1} = 0. \quad (70)$$

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} дифференцируются. Температурные функции $f_1, \mathrm{f}_2, \mathrm{f}_3, \mathrm{f}_4$ будут дифференцироваться по обоим координатам, поскольку предполагается температурное поле общего вида: $T = T(x, y, z)$.

Для данного случая система линейных уравнений термоупругости трехслойной лопатки с конструктивно-ортотропным заполнителем имеет весьма сложный вид [16] и ввиду громоздкости здесь не приводится.

Представим полученную систему уравнений в операторной форме:

$$\left.\begin{aligned}
&L_{11}\overline{u}_1 + L_{12}\overline{u}_2 + L_{13}\overline{\nu}_1 + \overline{L}_{14}\overline{\nu}_2 + L_{15}\overline{w} = L_1;\\
&L_{21}\overline{u}_1 + L_{22}\overline{u}_2 + L_{23}\overline{\nu}_1 + L_{24}\overline{\nu}_2 + L_{25}\overline{w} = L_2;\\
&L_{31}\overline{u}_1 + L_{32}\overline{u}_2 + L_{33}\overline{\nu}_1 + L_{34}\overline{\nu}_2 + L_{35}\overline{w} = L_3;\\
&L_{41}\overline{u}_1 + L_{42}\overline{u}_2 + L_{43}\overline{\nu}_1 + L_{44}\overline{\nu}_2 + L_{43}\overline{w} = L_4;\\
&L_{51}\overline{u}_1 + L_{52}\overline{u}_2 + L_{53}\overline{\nu}_1 + L_{54}\overline{\nu}_2 + L_{55}w = L_5.
\end{aligned}\right\} \quad (71)$$

Здесь безразмерные функции перемещений имеют вид:

$$\overline{u}_1 = u_1/h_0;\quad \overline{u}_2 = u_2/h_0;\quad \overline{\nu}_1 = \nu_1/h_0;$$
$$\nu_2 = \nu_2/h_0;\quad \overline{w} = w/h_0; \quad (72)$$

$L_{ik}\ (i,k = 1, 2, \ldots 5)$ и $L_j\ (j = 1 \div 5)$ – линейные дифференциальные операторы в частных производных, записанные в безразмерной системе координат (рис.2):

$$\xi = x/l;\quad \eta = y/b. \quad (73)$$

Функционал (59) доставляет также и краевые условия. Так как вариации независимых переменных произвольны для края $\xi = 0$ (жестко заделанный край) имеем:

$$u_\alpha = v_\alpha = u_\beta = w = w_{,1} = 0.$$

Учитывая выражение (48) получим:

$$u_1 = u_2 = \nu_1 = \nu_2 = w = w_{,1} = 0. \quad (75)$$

Граничные условия для свободного края лопатки $(\xi = 1)$.

Запишутся следующим образом:

$$N_{11} = N_{12} = 0;\ m_1 = m_2 = 0;\ M_{11} + m_1^* = 0;$$
$$\left(M_{11} + m_1^*\right)_{,1} + 2\left(M_{12} + m_{12}^*\right)_{,2} + N_{11}w_{,1} + N_{12}w_{,2} -$$
$$-\frac{h}{h_3}G_{13}^*\left(u_\alpha - \frac{h}{4}w_{,1}\right) = 0.$$

Граничные условия по второй и выходной кромкам лопатки $(\eta = 0; \eta = 1)$ запишутся следующим образом:

$$N_{22} = N_{12} = 0;\quad m_2 = m_{12} = 0;$$
$$M_{22} + m_2^* = 0;$$
$$\left(M_{22} + m_2^*\right)_{,2} + 2\left(M_{12} + m_{12}^*\right)_{,1} + N_{22}w_{,2} +$$
$$+ N_{12}w_{,1} - \frac{h}{h_3}G_{23}^*\left(u_\beta - \frac{h}{4}w_{,2}\right) = 0. \quad (77)$$

Граничные условия (76) и (77) можно записать в функциях перемещений используя выражения (49)-(54), (56), (60), (61).

Запишем выражения для напряжений. Из выражений (11) и (12) получим формулы для напряжений

$$\sigma_{11}^1 = \frac{E_1}{1-\mu_{12}\mu_{21}}[u_{1,1} - R^{-1}w + \mu_{21}\nu_{1,2} -$$
$$-(\alpha_1 + \mu_{21}\alpha_2)T];$$
$$\sigma_{22}^1 = \frac{E_2}{1-\mu_{12}\mu_{21}}[u_{1,2} + \mu_{12}(u_{2,1} - R^{-1}w) -$$
$$-(\alpha_2 + \mu_{12}\alpha_1)T];$$
$$\tau_{12}^1 = G(\nu_{1,1} + u_{1,2}); \quad (78)$$

– в нижнем несущем слое

$$\sigma_{11}^2 = \frac{E_1}{1-\nu_{12}\nu_{21}}[u_{2,1} + \mu_{21}\nu_{2,2} -$$
$$-R^{-1}w - (\alpha_1 + \mu_{21}\alpha_2)T];$$
$$\sigma_{22}^2 = \frac{E_2}{1-\nu_{12}\nu_{21}}[u_{2,2} + \mu_{12}(u_{2,1} - R^{-1}w) -$$
$$-(\alpha_2 + \mu_{12}\alpha_1)T];$$
$$\tau_{12}^2 = G(\nu_{2,1} + u_{2,2}); \quad (79)$$

– в заполнителе

$$\tau_{1z} = G_{13}^*\left[\frac{1}{c}(u_1 - u_2 - h_1 w_{,1})\right];$$
$$\tau_{2z} = G_{23}^*\left[\frac{1}{c}(\nu_1 - \nu_2 - h_1 w_{,2})\right]. \quad (80)$$

Решение исходной системы уравнений (71) в частных производных

К решению исходной системы уравнений эллиптического типа (71) 12-го порядка применяется метод интегральных соотношений Дородницына [25, 26]. В соответствии с методом исходную систему уравнений (71) представляем в дивергентной форме:

$$\frac{\partial\overline{X}}{\partial\xi} + \frac{\partial\overline{Y}}{\partial\eta} + \overline{L} = 0; \quad (81)$$
$$\overline{X} = \{X_i\} = \{\overline{u}_i, \overline{u}_2, \overline{\nu}_1, \overline{\nu}_2, \overline{w}, z_1, z_2, \ldots z_7\};$$
$$\overline{Y} = B_0\overline{X} + B_1\overline{X}_{,2} + B_2\overline{X}_{,22} + B_3\overline{X}_{,222};$$
$$\overline{L} = B\overline{X} + \overline{b}.$$

Здесь:

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

В соответствии с методом решение системы уравнений (81) ищем в виде конечного ряда:

$$\overline{X}(\xi,\eta) = \sum_{i=1}^{n} X_{ij}(\eta)P_i(\xi); \quad (82)$$
$$\overline{X} = \{X_i\} = \{\overline{u}_1, \overline{u}_2, \overline{\nu}_1, \overline{\nu}_2, \overline{w}\}.$$

В выражении (82) $P_i(\xi)$ – система аппроксимирующих функций; $X_{ij}(\eta)$ – неизвестные функции, определяемые в результате решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений.

В качестве системы аппроксимирующих функций выбираем ортонормированные на интервале [0, 1] полиномы Якоби [27, 28], подчиненные условиям жесткого закрепления лопатки при $\xi = 0$.

$$\mathrm{P}_1(\xi) = \sqrt{9}\left(28\xi^4 - 42\xi^3 + 15\xi^2\right); \quad (83)$$

$$\mathrm{P}_2(\xi) = \sqrt{11}\left(120\xi^5 - 252\xi^4 + 168\xi^3 - 35\xi^2\right);$$

$$P_3(\xi) = \sqrt{13}\left(495\xi^6 - 1320\xi^5 + 1260\xi^4 - 504\xi^3 + 70\xi^2\right)$$

Подставив ряды (82) в вариационное уравнение Лагранжа (58) и приведя двойной интеграл к повторному, представим функционал (59) следующим образом:

$$\int_{\eta_1}^{\eta_2}\sum_{\mathrm{k}}\left\{\int_{\xi_1}^{\xi_2}\left[\mathrm{L}_1\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) + P_1\right] + L_2\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) + \right.$$

$$+ L_3\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) + L_4\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) +$$

$$\left. + \left[L_5\left(\sum_i X_{ij}P_i - q\right)\right]\right\}P_k d\xi - j_2 P_k\Big|_{\xi_1=0}^{\xi_2=1}\delta\left(X_{ij}\right)_k d\eta -$$

$$- \int_{\xi_1}^{\xi_2} J_1\left(\sum X_{ij}P_i\right)d\xi = 0. \quad (84)$$

Поскольку вариации $\delta\left(X_{ij}\right)_k$ и $\left(\delta X'_{ij}\right)_k$ (k = 1,2, …, n) произвольны и независимы на основании соответствующих теорем вариационного исчисления имеем равенства:

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2}\left[\mathrm{L}_1\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) + p_1\right]\mathrm{P}_i d\xi = 0;$$

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2}\left[\mathrm{L}_2\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)\right]\mathrm{P}_i d\xi = 0;$$

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2}\left[\mathrm{L}_3\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)\right]\mathrm{P}_i d\xi = 0;$$

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2}\left[\mathrm{L}_4\left(\sum_i X_{ij}P_i\right)\right]\mathrm{P}_i d\xi = 0; \quad (85)$$

$$\int_{\xi_1}^{\xi_2}\left[\mathrm{L}_5\left(\sum_i X_{ij}P_i\right) - q\right]\mathrm{P}_i d\xi = 0;$$

$$\int_0^1 \left(N_{12} + m_{12}\right)P_k d\xi\Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0;$$

$$\int_0^1 \left(N_{22} + m_2\right)P_k d\xi\Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0; \quad (86)$$

$$\int_0^1 \left(M_{22} + m_2^*\right)P_k d\xi\Big|_{\eta=0}^{\eta=1} = 0;$$

$$\int_0^1 \left[\left(M_{22} + m_2^*\right)_{,2} + 2\left(M_{12} + m_{12}^*\right)_{,1} + N_{12}w_{,1} + \right.$$

$$\left. + N_{22}w_{,2} - \frac{h}{h_3}G_{23}^*\left(\mathrm{v}_\beta - \frac{h}{4}w_{,2}\right)\right]P_k d\xi\Big|_{\eta=0}^{\eta=1} -$$

$$- 2\left(M_{12} + m_{12}^*\right)P_k\Big|_0^1\Big|_0^1.$$

В результате мы получили систему вариационных уравнений (85) для определения функций $X_{ij}(\eta)$ 12-го порядка и необходимое количество граничных условий (86).

В дальнейшем представляя уравнения (86) через неизвестные функции $\overline{\mathrm{u}}_1$, $\overline{u}_2$, $\overline{\mathrm{v}}_1$, $\overline{\mathrm{v}}_2$, $\overline{w}$ мы получим 6 уравнений, определяющих граничные условия для лопатки.

Следует отметить, что точность решения задачи существенно зависит от выбора аппроксимирующих функций $P_i(\xi)$ – выражения (83).

Если последние точно удовлетворяют граничным условиям задачи, то внеинтегральные члены в уравнениях (85) опускаются.

В записанном виде уравнения (85) соответствуют обобщенному методу интегральных соотношений, который не требует от аппроксимирующих функций удовлетворения статическим граничным условиям.

После вычисления интегралов в выражении (85) приходим к решению краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, решение которой осуществляется модифицированным методом последовательных приближений, разработанным проф.В.А.Пухлий и изложенным им в академической печати [7-9].

С целью ускорения сходимости решения был использован метод телескопического сдвига степенного ряда Ланцоша, в соответствии с которым ряды Мак-Лорана представлялись через смещенные полиномы Чебышева [29-31].

Модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева

Представим полученную систему обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами (85) в виде системы уравнений 1-го порядка в нормальной форме Коши:

$$\frac{\mathrm{dX_m}}{\mathrm{d}\eta} = \sum_{v=1}^{S} B_{v,m}X_v + f_m \ (m = 1, 2,.., n). \quad (87)$$

В соответствии с методом переменные коэффициенты $\mathrm{B_{v,m}}$ и свободные члены f_m представим через смещенные полиномы Чебышева:

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

$$f_m=\sum_{r=0}^{q} f_{m,r}\left(d_r \cdot r!\right)^{-1} \sum_{k=0}^{k} a_k T_k^*(\eta). \qquad (88)$$

Здесь q – степень интерполяционного полинома; a_k – коэффициенты разложения η^r в ряд по многочленам Чебышева $T_k^*(\eta)$. В выражениях (88) $d_r=1$ для $r=0$ и $d_r=2^{2r-1}$ для остальных r.

Общее решение системы уравнений (87) запишем следующим образом [29-31]:

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

$$+\sum_{j=0}^{q} t_{m,j,0}\left[d_{j+1}(j+1)!\right]^{-1}\sum_{k=0}^{j+1} a_k T_k^*(\eta)+\sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n}\ . \qquad (89)$$

В выражении (89) $t_{m,j,0}=f_{m,r}$ при $j=r$; μ – номер фундаментальной функции; C_μ – постоянные интегрирования.

В решении (44) $\delta=1$, если $m=\mu$ и $\delta=0$ для остальных μ.

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

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

Последующие приближения осуществляются по формулам:

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

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

где $\beta=n(q+3)-2$. (90)

Системы фундаментальных функций (90) 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:

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

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

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

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

Постоянные C_μ, входящие в общем решении (89) находятся из граничных условий по входной и выходной кромкам лопатки (86).

Заключение

1. В рамках несвязанной квазистатической теории термоупругости предложены математическая модель и алгоритм расчета трехслойных конструктивно-ортотропных рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок с воздушным охлаждением.
2. При построении модели лопатка схематизируется как трехслойная конструктивно-ортотропная оболочка, при этом набор ребер охлаждающих каналов рассматривается как жесткий несжимаемый в поперечном направлении заполнитель.
3. Аналитическое решение задачи основано на применении метода интегральных соотношений Дородницына и модифицированного метода последовательных приближений, [7-9] разработанного проф. В.А. Пухлий и опубликованный им в академической печати.
4. Для ускорения сходимости предложенного решения применяется метод телескопического сдвига степенных рядов Ланцоша, при котором ряды Мак-Лорена представляются через многочлены Чебышева [29-31].

Список литературы

1. Биргер И.А. Расчет на прочность лопаток / Биргер И.А. // М.: Оборонгиз, 1956.
2. Биргер И.А. Пространственное напряженное состояние в лопатках с начальной закруткой / Биргер // Труды ЦИАМ, вып.2, №996, 1982, с.7-23.
3. Шорр Б.Ф. Расчет на прочность естественно закрученных лопаток / Шорр Б.Ф // Труды ЦИАМ, №256, 1954, с.
4. Рудавец В.А. Расчет собственных частот и форм пространственных полебаний закрученных компрессорных лопаток / Рудавец В.А,, Шорр Б.Ф. // В кн.: Теория оболочек и пластин. – М.: Изд-во «Наука», 1973, с.550-555.
5. Пухлий В.А. К расчету трехслойных естественно закрученных лопаток осевых турбомашин / Пухлий В.А., Поляков В.А. // Труды ЦИАМ, вып.2, №996, 1982, с.115-128.
6. Пухлий В.А. Однородные и слоистые оболочки переменной жесткости / Пухлий В.А. // Научные труды в 4-х томах. Том 2. – Севастополь, 2002. – 362

с.
7. Пухлий В.А. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений / Пухлий В.А. // Журн. вычислит. матем. и матем физики, 1978, том 18, №5, С.1275-1282.
8. Пухлий В.А. Об одном подходе к решению краевых задач математической физики / Пухлий В.А. // Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11. – С.2039-2043.
9. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений / Пухлий В.А. // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2017, том 24, вып.1. – С.37-48.
10. Пухлий В.А. К вопросу об эффективном использовании пакетов прикладных программ в расчетах гидродинамических процессов / Пухлий В.А., Выскребцов В.Г., Померанская А.К. // Труды 10-й МНТК «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск: СКБ «Гидропресс», 2017. – С.93-94.
11. Каблов Е.Н. Монокристаллические лопатки для перспективных газотурбинных двигателей / Каблов Е.Н. // В сб.: Горный. Информационно-аналитический бюллетень. – М.: Изд-во Моск. государственного горного университета, 2005. – С.159-171.
12. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технолгий их переработки на период до 2030 года / Каблов Е.Н. // Авиационные материалы и технологии, 2012, №5. - С.7-17.
13. Петрунин Н.В. Структурно-фазовые характеристики жаропрочных эвтектических композитов γ/γ-NbC, содержащих рений и рутений / Петрунин Н.В., Елютин Е.С., Джиоева Е.С. // Перспективные материалы, 2015, №3. – с.22-33.
14. Иванов В.Л. Воздушное охлаждение лопаток газовых турбин / Иванов В.Л. // Учебное пособие, изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2013. – 94 с.
15. Иванов В.Л. Теплообменные аппараты и системы охлаждения газотурбинных и комбинированных установок / Иванов В.Л., Манушин Э.А. // М.: Изд-во МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2019. – 342 с.
16. Пухлий В.А. Трехслойные ортотропные оболочки переменной жесткости. Теория и приложения // Пухлий В.А. // Прикладная механика, 1980, том 16, №9. – с.48-55.
17. Прочность, устойчивость, колебания. / Справочник под ред. И.А.Биргера и Я.Г.Пановко // М.: Машиностроение, 1968, том 2. С. 245-326.
18. Погорелов А.В. Дифференциальная геометрия / Погорелов А.В. // М.: Физматлит, 1969, - 340 с.
19. Алберг Дж. Теория сплайнов и ее приложения / Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. // М.: Изд-во «Мир», 1972. – 318 С.
20. Gibbs J.W. On the equilibrium of heterogeneous substrances / Gibbs J.W. // Trans of the connectial Academy. – New-York, 1876. – 146 p.
21. Weiner J.H. A uniqueness for the coupled thermoelastic problem / Weiner J.H. // Quart of Appl. Math., 1957, vol,15, №1. – 44 p.
22. Kochin N.E. Vector calculation and the beginning tensor calculations / Kochin N.E. // M.: Publishing house AN of the USSR, 1961. – 348 p.
23. Григолюк Э.И. Конечные прогибы трехслойных оболочек с жестким заполнителем / Григолюк Э.И. // Известия АН СССР, ОТН, 1958, №1. С.26-34.
24. Пухлий В.А. Применение теории трехслойных конструктивно-ортотропных оболочек к расчету НДС рабочих лопаток газотурбинных и комбинированных установок / Пухлий В.А. // Теория механизмов и машин (ТММ), 2019. том 17, №3(43), с.86-98.
25. Дородницын А.А. Об одном методе численного решения некоторых нелинейных задач аэрогидродинамики / Дородницын А.А. // Труды 3-го Всес. матем. съезда, том III. – М.:Изд-во АН СССР, 1958, с.447-453.
26. Дородницын А.А. Об одном методе решения уравнений ламинарного пограничного слоя / Дородницын А.А. // Журн. прикл. матем. и техн. физики, 1960, №3, с.111-118.
27. Курант Р. Методы математической физики // Курант Р., Гильберт Д. // М.: Гостехиздат, Том 1, 1953.
28. Люк Ю. Специальные математические функции и их аппроксимации / Люк Ю. // М.: Изд-во «Мир», 1980. – 510 с.
29. Пухлий В.А. Аналитический метод решений краевых задач теории оболочек / Пухлий В.А. // Труды XIII Всес. конф. по теории пластин и оболочек. Таллин: Изд-во ТПИ, 1983, С. 101-107.
30. Пухлий В.А. решение задачи об изгибе модифицированным методом последовательных приближений / Пухлий В.А. // Прикладная механика, 1986, том 22, №10, с.62-67.
31. Пухлий В.А. Практические методы прикладной и промышленной математики / Пухлий В.А. // Обозрение прикладной и промышленной математики, 2019, том 26, вып.3, с.193-214.
32. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей / Скубачевский Г.С. // М.: Машиностроение, 1974. – 520 с.

References

1. Birger I.A. The calculation of the strength of the blades / Bir-ger I.A. // M .: Oborongiz, 1956.
2. Birger I.A. Spatial stress state in the blades with the initial twist / Birger // Transactions of TsIAM, issue 2, No. 996, 1982, pp. 7-23.
3. Shorr B.F. Strength calculation of naturally twisted blades / Shorr B.F // Transactions of TsIAM, No. 256, 1954, p.
4. Rudovets V.A. Calculation of natural frequencies and spatial forms of swaying of swirling compressor blades / Rudovets V.A., Shorr B.F. // In the book: Theory of shells and plates. - M.: Publishing House "Science", 1973, S. 550-555.
5. Pukhliy V.A. To the calculation of three-layer naturally swirling blades of axial turbomachines / Pukhliy V.A., Polyakov V.A. // Transactions of TsIAM, issue 2, No.

996, 1982, p. 115-128.
6. Pukhliy V.A. Homogeneous and layered shells of variable stiffness / Pukhliy V.A. // Scientific works in 4 volumes. Volume 2. - Sevastopol, 2002 .-- 362 p.
7. Pukhliy V.A. The method of analytical solution of two-dimensional boundary value problems for systems of elliptic equations / Pukhliy V.A. // Journal. will calculate. mate. and Matem Physics, 1978, Volume 18, No. 5, S.1275-1282.
8. Pukhliy V.A. About one approach to solving boundary value problems of mathematical physics / VA Pukhliy // Differential Equations, 1979, Volume 15, No. 11. - S.2039-2043.
9. Pukhliy V.A. The solution of initial boundary-value problems of mathematical physics by the modified method of successive approximations / VA Pukhliy // Review of Applied and Industrial Mathematics, 2017, Volume 24, Issue 1. - S. 37-48.
10. Pukhliy V.A. On the question of the effective use of application software packages in the calculation of hydrodynamic processes / Pukhliy V.A., Vyskrebtsov V.G., Pomeranskaya A.K. // Works of the 10th ISTC "Ensuring the safety of nuclear power plants with VVER", Podolsk: SKB Gidropress, 2017. - P.93-94.
11. Kablov E.N. Monocrystalline blades for promising gas turbine engines / Kablov E.N. // In Sat: Mountain. Information and analytical bulletin. - M.: Publishing House Mosk. State Mining University, 2005. - S.159-171.
12. Kablov E.N. Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030 / Kablov E.N. // Aviation materials and technologies, 2012, No. 5. - S.7-17.
13. Petrunin N.V. Structural-phase characteristics of heat-resistant eutectic γ / γ-NbC composites containing rhenium and ruthenium / Petrunin N.V., Eljutin ES, Dzhioeva ES // Promising materials, 2015, No. 3. - p. 22-33.
14. Ivanov V.L. Air cooling of gas turbine blades / Ivanov V.L. // Textbook, publishing house of MSTU named after N.E.Bauman, 2013 .-- 94 p.
15. Ivanov V.L. Heat exchangers and cooling systems for gas turbine and combined installations / Ivanov V.L., Manushin E.A. // M .: Publishing house of the MSTU named after N.E.Bauman, 2019 .-- 342 p.
16. Pukhliy V.A. Three-layer orthotropic shells of variable stiffness / Pukhliy V.A. // Applied Mechanics, 1986, Volume 16, No. 9. - p. 48-55.
17. Strength, stability, fluctuations. / Reference book under the editorship of I.A. Birger and Ya.G. Panovko // M.: Mechanical Engineering, 1968, Volume 2. P. 245-326.
18. Pogorelov A.V. Differential geometry / Pogorelov A.V. // M .: Fizmatlit, 1969, - 340 p.
19. Alberg J. Theory of splines and its applications / Alberg J., Nielson E., Walsh J. // M.: Mir Publishing House, 1972. - 318 S.
20. Gibbs J.W. On the equilibrium of heterogeneous substrances / Gibbs J.W. // Trans of the connectial Academy. - New-York, 1876. - 146 p.
21. Weiner J.H. A uniqueness for the coupled thermoelastic problem / Weiner J.H. // Quart of Appl. Math., 1957, vol,15, №1. – 44 p.
22. Kochin N.E. Vector calculation and the beginning tensor calculations / Kochin N.E. // M.: Publishing house AN of the USSR, 1961. – 348 p.
23. Grigolyuk E.I. Finite deflections of three-layer shells with rigid aggregate / Grigolyuk E.I. // Proceedings of the Academy of Sciences of the USSR, OTN, 1958, No. 1. S.26-34.
24. Pukhliy V.A. Application of the theory of three-layer structural-orthotropic shells to the calculation of the VAT of the working blades of gas turbine and combined installations / Pukhliy V.A. // Theory of mechanisms and machines (TMM), 2019.Vol. 17, No. 3 (43), pp. 86-98.
25. Dorodnitsyn A.A. About a method for the numerical solution of some nonlinear problems of aerohydrodynamics / A. Dorodnitsyn // Proceedings of the 3rd All. mate. Congress, Volume III. - M.: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1958, p. 447-453.
26. Dorodnitsyn A.A. About a method for solving the equations of a laminar boundary layer / A. Dorodnitsyn // Journal. adj. mate. and tech. Physics, 1960, No. 3, pp. 111-118.
27. Courant R. Methods of mathematical physics // Courant R., Hilbert D. // M .: Gostekhizdat, Volume 1, 1953.
28. Luke Yu. Special mathematical functions and their approximations / Luke Yu. // Moscow: Mir Publishing House, 1980. - 510 p.
29. Pukhliy V.A. An analytical method for solving boundary value problems of the theory of shells / Pukhliy V.A. // Proceedings of the XIII All. conf. on the theory of plates and shells. Tallinn: TPI Publishing House, 1983, pp. 101-107.
30. Pukhliy V.A. solution of the problem of bending by the modified method of successive approximations / VA Pukhliy // Applied Mechanics, 1986, Volume 22, No. 10, pp. 62-67.
31. Pukhliy V.A. Practical methods of applied and industrial mathematics / Pukhliy V.A. // Review of applied and industrial mathematics, 2019, Volume 26, Issue 3, pp. 193-214.
32. Skubachevsky G.S. Aircraft gas turbine engines. Design and calculation of parts / Skubachevsky G.S. // M.: Mechanical Engineering, 1974. - 520 p.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК [621.311.25:68.51](075.8)

Особенности работы автоматического регулятора мощности в режиме «Н»

К.П. Аникевич, Т.Г.Зацаринная, Ю.В.Браславский
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, anikonst@mail.ru, biochip@mail.ru, a1a67@yandex.ru

Статья поступила 08.11.2019 г.; после доработки 12.11.2019 г.

Аннотация

При эксплуатации энергоблока с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) реализуется программа поддержания постоянного давления пара в главном паровом коллекторе. Функцию поддержания давления пара в ГПК выполняют два регулятора: электрогидравлическая система регулирования турбины ЭГСР, работающая в режиме регулирования давления «РД-1», или автоматический регулятор мощности реактора АРМ, работающий в режиме поддержания постоянного давления пара в главном паровом коллекторе «Режим Т». Совместная работа двух регуляторов ЭГСР и АРМ обеспечивается различными режимами их работы на энергоблоке. В данной статье описываются особенности работы АРМ в режиме «Н» и приводятся результаты проведенных исследований по устойчивости и качеству работы АРМ для режима «Н».

Ключевые слова: ядерный реактор, нейтронная мощность, реактивность, поток нейтронов, регулирующее устройство, исполнительный механизм.

Operation features of automatic power adjustor acting in mode ‘N’

K.P. Anikevich, T.G.Zatsarinnaya, Yu.V.Braslavskiy
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, anikonst@mail.ru, biochip@mail.ru, a1a67@yandex.ru

Received 08.11.2019 y.; received in final form 12.11.2019 y.

Abstract

An adjustment program of constant steam pressure in the main steam manifold (MSM) is realized during operation of a power unit with a water-to-water power reactor (WWPR). The function of maintaining steam pressure in the MSM is controlled by two adjustors. They are an electro-hydraulic control system (EHCR) operating in a pressure control mode which is called in short manner as RD-1, or automatic power adjustor (APA) operating with ongoing pressure at the inlet into the turbine control valves, so called the mode ‘T’. Joint work adjustors are provided by opposite modes of their operation in the power unit. Thus the operation features and the results of researches on the stability and quality above mentioned adjustor which operates in the mode ‘N’ are described in this article.

Keywords: nuclear reactor, neutron power, reactivity, neutron flux, control device, actuator.

Введение

Основным требованием, предъявляемым к технологическому процессу АЭС, является обеспечение безопасности и надежности ее работы. Под безопасностью понимается уменьшение (практически до нуля) вероятности радиационного поражения персонала АЭС и выброса радиоактивных веществ в окружающую среду в ко-

личествах, которые могут принести ущерб прилегающей территории и населению, как в нормальных режимах работы АЭС, так и в аварийных ситуациях. Надежность АЭС означает уменьшение числа аварийных остановок, возможность сохранения частичной мощности блока при возникновении аварий в основном технологическом оборудовании и быстрый набор полной нагрузки послеаварийной остановки или снижения мощности. Другим важнейшим требованием является экономичность работы АЭС, т. е. уменьшение затрат горючего, электроэнергии собственных нужд, вспомогательных материалов, заработной платы на выработку 1 кВт-ч электрической энергии [1].

Обеспечение безопасности, надежности и экономичности технологического процесса возможно только при условии полного контроля технологических параметров (температуры, давления, расхода, частоты вращения ротора турбины и т.д.). Даже незначительные отклонения параметров от заданных значений могут привести к снижению экономичности, и аварийной обстановке. Поэтому контроль текущих параметров технологического процесса – безусловная необходимость, которая обеспечивается системами автоматического управления АЭС.

Сущность процесса управления технологическим объектом (ТО), в качестве которого выбрана атомная энергетическая установка (АЭУ) отражена на рисунке 1.

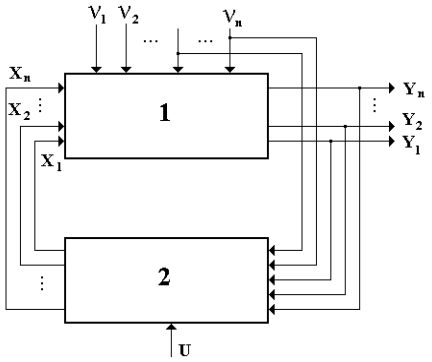


Рис. 1. Структурная схема САУ АЭУ.

Стационарные режимы работы атомной энергетической установки (АЭУ) не могут поддерживаться самопроизвольно, поскольку в процессе работы энергетическая установка неизбежно подвергается различным возмущающим воздействиям $\upsilon_1, \upsilon_2, ...\upsilon_n$. Эти возмущения могут быть как внешние (изменения нагрузки энергосистемы), так и внутренние (плановые или аварийные переключения оборудования и пр.). Действие внутренних и внешних возмущений приводит к отклонению величин $Y_1, Y_2, ...Y_n$ от заданных значений, и для возвращения их к требуемым пределам необходимо с помощью исполнительных органов изменять значения управляющих воздействий. Расчет необходимой величины управляющих воздействий $X_1, X_2, ...X_n$ производится системой управления и защиты 2 (СУЗ).

Поскольку СУЗ является частью АСУ ТП АЭС, то задающее воздействие U определяется с учетом информации от смежных управляющих систем.

Основные задачи, которые должна решать СУЗ энергетического реактора, можно сформулировать так:

- обеспечение изменения мощности (или другого параметра) реактора в нужном диапазоне с требуемой скоростью;
- поддержание мощности (или другого параметра) на определенном заданном уровне;
- компенсация изменений реактивности реактора;
- обеспечение безопасной работы реактора путем прекращения цепной реакции деления при возникновении аварийных условий.

Таким образом, реализация поставленных задач требует от СУЗ реактора выполнения следующих функций:

- автоматического регулирования мощности ядерного реактора (ЯР) в соответствии с мощностью, отдаваемой турбогенераторами в сеть, или стабилизация мощности ЯР на заданном уровне;
- пуска (вывода) ЯР на мощность в ручном режиме;
- компенсации изменения реактивности в ручном и автоматическом режимах;
- аварийной защиты ЯР, выражающейся в прекращении или замедлении цепной реакции в активной зоне (АЗ) ЯР;
- сигнализации о причинах срабатывания аварийной защиты и неисправностях, возникающих в СУЗ;
- автоматического шунтирования некоторых сигналов аварийной защиты;
- индикации положения ОР ЯР на блочном щите управления (БЩУ) и резервном щите управления (РЩУ), а также выдачи информации о положении каждого ОР в систему внутриреакторного контроля (СВРК) и управляющую вычислительную систему (УВС) энергоблока.

Ядерный реактор управляется, главным образом, с помощью СУЗ. Как объект управления ЯР обладает существенными особенностями по сравнению с другими объектами АЭС, поэтому выбор программы регулирования ЯЭУ весьма сложный процесс, требующий учета многих эксплуатационных особенностей данного объекта.

Для энергоблоков двухконтурных ЯЭУ, работающих на насыщенном паре, можно отметить два основных типа программ регулирования: регулирование при постоянной средней температуре теплоносителя и регулирование при постоянном давлении пара в паропроводе. Далее остановимся на некоторых особенностях работы энергоблока по программе P_{II}=*const* и работе АРМ в режиме поддержания нейтронной мощности «Н».

Анализ программы регулирования энергоблоков двухконтурных ЯЭУ АЭС.

Программа регулирования энергоблоков двухконтурных ЯЭУ АЭС с корпусными водоводяными реакторами и с парогенераторами, генерирующими сухой насыщенный пар при постоянном давлении пара в паропроводе (рисунок 1) обладает определенными достоинствами и недостатками.

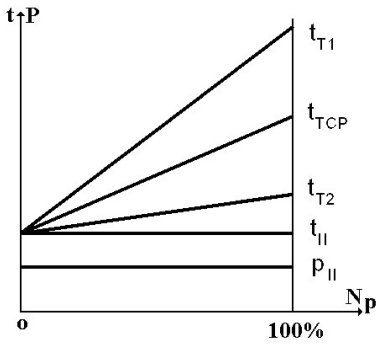


Рис. 2. Программа регулирования энергоблоков двухконтурных ЯЭУ, работающих на сухом насыщенном паре по программе P_{II}= *const*.

Регулирование энергоблоков по программе P_{II}=*const* позволяет увеличить номинальное давление пара до предельно возможного, поэтому КПД цикла выше не только на промежуточных режимах из-за уменьшения дросселирования пара, но и на номинальном режиме; внутренний КПД турбины также выше.

Многие из устройств II контура работают при постоянном давлении пара и, следовательно, при постоянной температуре, что также благоприятно сказывается на надежности работы оборудования второго контура и на маневренных свойствах ПТУ.

Тем не менее, программа P_{II}= *const* имеет определенные недостатки.

Во-первых, при изменении мощности ЯЭУ из-за изменения температурного режима ядерного реактора изменяется его реактивность, что увеличивает нагрузку на систему управления реактором.

Во-вторых, изменение температурного режима реактора при изменении мощности вызывает увеличение термических напряжений в толстостенных конструкциях трассы I контура.

В-третьих, с изменением мощности увеличивается нагрузка на систему компенсации давления I контура и ее регуляторы. И, наконец, несколько ухудшаются динамические характеристики установки при значительных сбросах и набросах нагрузки на установку.

Два регулятора, регулятор турбины и автоматический регулятор мощности, реализуют программу P_{II}= *const*, работая одновременно, но в различных режимах.

Режим «Т» является основным режимом работы АРМ и ЭГСР и связано это с тем, что технологическим продуктом АЭС является электроэнергия, измеряемая в КВт*ч и стабильная мощность турбогенератора, выдержанная в заданных пределах, один из важнейших показателей качества работы АЭС.

Поддержание нейтронной мощности активной зоны реактора очень важно для обеспечения ядерной и теплотехнической безопасности реактора.

При превышении определенных пределов нейтронной мощности, АРМ переходит в режим «Н». Возможность удержания нейтронной мощности в заданных пределах также является основным показателем качества работы АРМ в режиме «Н».

Таким образом, АРМ поддерживает мощность реактора в соответствии с мощностью турбогенератора, а также стабилизирует мощность реактора на заданном уровне.

АРМ в режиме поддержания нейтронной мощности «Н».

Рассмотрим работу АРМ в режиме поддержания нейтронной мощности «Н».

При работе реактора в рабочем поддиапазоне $(0{,}03 < P_{\%} \le 1{,}20)$ нейтронная мощность

$P_{\%}$ поддерживается на заданном уровне $P_{\%}$ с относительной погрешностью, не превышающей по абсолютной величине 2 %.

Из теории автоматического управления известно, что если система предназначена для стабилизации параметров, которые в процессе эксплуатации незначительно отклоняются от заданных значений, то характеристики объекта управления (в нашем случае ядерного реактора) могут быть описаны с помощью линейных дифференциальных уравнений или эквивалентных им передаточных функций и динамических характеристик.

Такой подход был использован при обосновании структуры системы (рисунок 2) и закона управления, а также для качественной оценки и описания процессов регулирования.

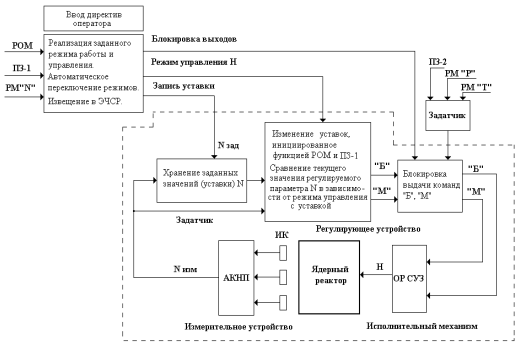


Рис. 3. Структура системы, реализующая функцию в режиме стабилизации нейтронной мощности.

Если же система должна работать при больших отклонениях управляемых величин, особенно вызванных глубокими нарушениями, описание динамики объекта в линейном приближении дает большую погрешность, и аппарат передаточных функций и динамических характеристик становится неприемлемым [2].

Чтобы получить более точные результаты при выборе настроек регулятора, отработке программного обеспечения и испытаниях реального регулирующего устройства используют математические модели реакторной установки. Эти модели представлены в виде расчетных кодов.

Структурная схема АРМ в режиме стабилизации нейтронной мощности, представлена на рисунке 4 в виде соединения составляющих ее типовых динамических звеньев [3, 4].

Объект управления в этой системе – ядерный реактор, динамические свойства которого характеризуются звеньями ограниченными штриховыми линиями. Входом объекта является среднее положение ОР по высоте Н. Перемещение регулирующей группы меняет реактивность и среднюю плотность нейтронов N в активной зоне, от которой зависит нейтронная мощность реактора.

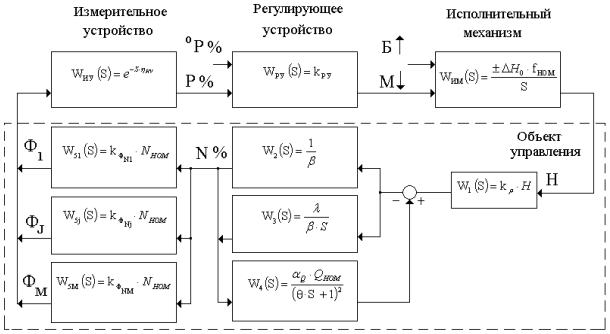


Рис. 4. Функциональная структура САР нейтронной мощности (режим Н). Динамические звенья.

Изменение реактивности $\Delta\rho$, вызванное перемещением регулирующей группы ОР на величину ΔH, происходит практически без запаздывания:

$$\Delta\rho = k_{\rho H} \cdot \Delta H ,$$

где $k_{\rho H}$ - коэффициент, зависящий от положения регулирующей группы в момент начала перемещения, концентрации борной кислоты в воде 1 контура и других факторов.

Передаточная функция, связывающая перемещение $\Delta H(S)$ с изменением реактивности, соответствует безынерционному звену:

$$W_1(S) = \Delta\rho(S)/\Delta H(S) = k_\rho \cdot H .$$

Текущее значение плотности нейтронов $N(t)$, усредненной по объему активной зоны, при скачкообразном (ступенчатом) изменении реактивности $\Delta\rho_0 = const$ [2]:

$$N(t) = N(0)\frac{\beta}{\beta - \Delta\rho_0} \cdot e^{\frac{t}{\theta}},$$

где $N(0)$ – начальная плотность нейтронов (при t=0);

β – доля запаздывающих нейтронов;

$\theta = \dfrac{\beta - \Delta\rho_0}{\lambda - \Delta\rho_0\theta}$ – постоянная времени;

λ – постоянная распада ядер - осколков разделившегося ядра U-235.

Изменение относительной плотности нейтронов $\Delta N_{\%}(t)$ при единичном ступенчатом изменении входной величины $\Delta\rho_0$ можно приближенно представить в виде

$$\Delta N_{\%}(t)=\frac{N(t)-N(0)}{N_{ном}}=\frac{N_{\%}(0)\left(\beta\left(e^{\frac{t}{\theta}}-1\right)+\Delta\rho_0\right)}{\beta-\Delta\rho_0},$$

где $N_{ном}$ – плотность нейтронов, соответствующая номинальной мощности реактора;

$N_{\%}(0)=\frac{N(0)}{N_{ном}}$ – относительная плотность нейтронов при $t=0$.

Чтобы исключить возможность разгона реактора на мгновенных нейтронах, в процессе регулирования должно выполняться условие $\Delta\rho << \beta$, поэтому в начальный момент времени (при $t\to 0$) изменение относительной плотности нейтронов

$$\Delta N_{\%}=N_{\%}(0)\cdot\frac{\Delta\rho_0}{\beta}.$$

Таким образом, в результате малого изменения реактивности (например, $\rho(0)=0{,}1\%$) относительная плотность нейтронов скачком (фактически за сотые доли секунды) изменяется на $\Delta\rho_0/\beta=0{,}16$ от начального значения $N_{\%}(0)$, после чего начинает медленно увеличиваться (если $\Delta\rho_0>0$), или уменьшаться (если $\Delta\rho_0<0$) по экспоненте с постоянной времени

$$\frac{\beta}{\lambda\cdot\Delta\rho_0}=64$$

В случае ввода отрицательной реактивности $\Delta N_{\%}(t)\to 0$ при $t\to\infty$, т.е. после окончания переходного процесса, относительная плотность нейтронов возвращается к начальному значению $N_{\%}(0)$ примерно через 200…300 с, если за это время не происходит нового изменения реактивности.

При произвольном малом изменении $\Delta\rho(t)$ получено уравнение [2]:

$$\frac{dN(t)}{dt}=\frac{N(0)}{\beta}\cdot\left[\frac{d\rho(t)}{dt}+\lambda\cdot\rho(t)\right], \qquad (1)$$

Разделив обе части выражения (1) на $N_{ном}$ и перейдя к изображениям, найдем

$$N_{\%}(S)=N_{\%}(0)\cdot\left[\frac{1}{\beta}+\frac{\lambda}{\beta\cdot S}\right]\cdot\rho(S). \qquad (2)$$

Это выражение соответствует структуре, состоящей из параллельного соединения двух типовых звеньев: безинерционного с передаточной функцией $W_2(S)=N_{\%}(0)/\beta$ и интегрирующего, передаточная функция которого $W_3(S)=N_{\%}(0)\cdot\lambda/\beta\cdot S$.

Передаточные функции $W_2(S)$ и $W_3(S)$ зависят только от свойств ядерного топлива (доли запаздывающих нейтронов и постоянной распада ядер – осколков деления λ, которые одинаковы для всех реакторов ВВЭР) и от относительной плотности нейтронов $N_{\%}(0)$ в начальный момент времени. Показанные на рис. 4 передаточные функции $W_2(S)$ и $W_3(S)$ соответствуют $N_{\%}(0)=1$ (регулирование на номинальной мощности реактора).

Кроме перемещения регулирующей группы ОР, на реактивность влияет также вызванное этим перемещением изменение мощности реактора, поскольку при этом меняются температура топлива и теплоносителя и зависящие от нее нейтронно-физические характеристики активной зоны (плотность т/н и др.). Соответственно изменяются эффективный коэффициент размножения нейтронов $k_{эф}$ и реактивность ρ. Характер зависимости ρ от мощности определяется составом, компоновкой и геометрией активной зоны, и может меняться, даже для одного и того же реактора, в зависимости от температуры 1 контура, содержания растворенного в нем жидкого поглотителя нейтронов, выгорания ядерного топлива и других факторов.

При точных расчетах и моделировании динамики реакторов влияние технологических параметров на реактивность учитывают, вводя соответствующие коэффициенты реактивности по температуре топлива и температуре теплоносителя 1 контура [5].

Для упрощения будем считать, что в установившемся состоянии малому изменению мощности соответствует пропорциональное ему изменение реактивности.

Коэффициент пропорциональности (коэффициент реактивности по мощности реактора) α_Q учитывает совокупный эффект от изменения температуры топлива и теплоносителя. Его можно определить как изменение реактивности, вызванное изменением мощности на 1 МВт.

Для реакторов ВВЭР в интервале рабочих температур коэффициент $\alpha_Q=-1{,}28\cdot10^{-5}$ Мвт$^{-1}$. При увеличении концентрации борной кислоты в воде 1 контура от 0 до 8,6 г/кг$^{-1}$, значение α_Q, оставаясь отрицательным, увеличивается до $0{,}75\cdot10^{-5}$ Мвт$^{-1}$ [2].

Зависимость α_Q от мощности реактора в начале и конце кампании топливной загрузки приведена в [6].

Запаздывание изменения температуры топлива и теплоносителя (следовательно, и реактивности) по отношению к вызвавшему его изменению мощности предложено учитывать, вводя в

структуру объекта управления отрицательную обратную связь через динамический элемент с передаточной функцией

$$W_4(S)=\alpha_Q\cdot Q_{ном}/(\theta\cdot S+1)^2, \quad (3)$$

соответствующий двум последовательно соединенным апериодическим звеньям с коэффициентами передачи $\alpha_Q\cdot Q_{ном}$ и постоянными времени θ [2].

В случае быстрого изменения реактивности такая запаздывающая обратная связь может приводить к появлению переходного выброса на начальном участке характеристики $N(t)$. Выброс выражен тем сильнее, чем больше значение $\alpha_Q\cdot Q_{ном}$, и увеличивается с ростом постоянных времени. На процесс автоматического регулирования запаздывающая обратная связь влияет незначительно вследствие значительно медленного изменения мощности реактора в рабочем режиме. Однако при быстрых изменениях мощности, например, при срабатывании АЗ или УПЗ, наличие такой обратной связи (приводящей к повышению реактивности при уменьшении температуры топлива и теплоносителя) может иметь негативные последствия.

С учетом структуры связей и динамических характеристик звеньев, участвующих в преобразовании перемещения регулирующей группы ОР в относительное изменение средней плотности нейтронов, получим

$$N_{\%}(S)=W^*(S)\cdot H(S). \quad (4)$$

где передаточная функция

$$W^*(S)=\frac{W_1(S)\cdot(W_2(S)+W_3(S))}{1-(W_2(S)+W_3(S))\cdot W_4(S)}.$$

Поскольку непосредственное измерение средней плотности нейтронов в активной зоне практически невозможно, в качестве выхода объекта в режиме управления Н рассматривают плотность потока нейтронов утечки $(\Phi_1...\Phi_м)$ в местах размещения ионизационных камер, по сигналам которых измерительное устройство вычисляет нейтронную мощность.

Как известно, вероятность утечки мгновенных нейтронов из активной зоны составляет для реакторов ВВЭР около 3% для быстрых и примерно 1% для тепловых нейтронов, а утечкой запаздывающих нейтронов можно пренебречь [6]. Среднее время жизни быстрых нейтронов утечки – около $10^{-5}...10^{-6}$ с, тепловых – менее 10^{-3} с (соответствует среднему времени их замедления и диффузии в теплоносителе 1 контура). Это позволяет считать, что изменение плотности потока нейтронов утечки $\Delta\Phi_j(t)$ в местах размещения детекторов в любой момент времени пропорционально изменению средней плотности нейтронов $\Delta N(t)$ в активной зоне:

$$\Delta\Phi_j(t)=K_{\Phi\text{Nj}}\cdot\Delta N(t)=K_{\Phi\text{Nj}}\cdot N_{ном}\cdot\Delta N_{\%}(t). \quad (5)$$

где $K_{\Phi\text{Nj}}$ - коэффициенты пропорциональности; $j=1...M$;

M- количество мест контроля (размещение детекторов).

Отсюда следует, что изображения $\Phi_j(S)$ связаны с изображением $N_{\%}(S)$ передаточной функцией $W_{5j}(S)=K_{\Phi\text{Nj}}\cdot N_{ном}$, соответствующей безынерционному звену. Несимметрия плотности нейтронов по радиусу и, особенно, по высоте активной зоны приводит к тому, что коэффициенты $K_{\Phi\text{Nj}}$ зависят от мест установки детекторов и могут отличаться друг от друга, что должно учитываться при калибровке детекторов. Кроме того, на эти коэффициенты влияет возможное экранирование окружающими конструкциями, а также перемещение групп органов регулирования в процессе реализации функций ПЗ-1, РОМ и УПЗ, при котором может происходить перераспределение плотности нейтронов по высоте активной зоны. Смягчение таких влияний должно обеспечить использование в объекте управления нескольких (М) выходов (вместе с надлежащим выбором точек, в которых контролируется плотность потока нейтронов утечки) и алгоритм вычисления нейтронной мощности, принятый для измерительного устройства.

Передаточные функции объекта управления по каждому выходу j

$$W_{ОБj}(S)=W^*(S)\cdot W_{Sj}(S)=\\ =\frac{W_2(S)+W_3(S)}{1-[W_2(S)+W_3(S)]\cdot W_4(S)}\cdot W_{Sj}(S). \quad (6)$$

Статический коэффициент передачи объекта управления по каждому из выходов получим из (6), подставив значения передаточных функций $W_1(S)..W_{5j}(S)$ и приравняв S к нулю [3]:

$$K_{ОБj}=\frac{\Phi_j}{H}=\frac{K_{\rho H}\cdot K_{\Phi Nj}}{\alpha_Q\cdot Q_{ном}} \quad (7)$$

Измерительное устройство получает и обрабатывает данные о плотности потока нейтронов утечки ($\Phi_1...\Phi_M$) и определяет по ним текущее значение параметра $P_{\%}$:

$$P_{\%}=\frac{1}{\sum\alpha_j}\cdot\sum_{j=1}^{M}\alpha_j\cdot\frac{\Phi_j}{\Phi_{ном\,\text{j}}}, \quad (8)$$

где M – количество детекторов;

α_j – безразмерный коэффициент: $\alpha_j = 0$, если данные от j-го детектора недостоверны или отсутствуют; $\alpha_j = 1$, если данные достоверны;

$\Phi_{ном\ j}$ – плотность потока нейтронов в месте расположения j-го детектора при номинальной мощности реактора.

Полученную таким образом безразмерную величину $P_{\%}$ считают мерой текущего значения относительной мощности реактора. Если данные всех детекторов нейтронного потока достоверны, относительная нейтронная мощность

$$P_{\%} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^{M} \frac{\Phi_j}{\Phi_{ном\ j}} = \frac{1}{M} \cdot \sum_{j=1}^{M} \Phi_j \qquad (9)$$

где $\Phi_{\%\ j}$ – относительная плотность потока нейтронов утечки по данным j-го детектора.

С учетом запаздывания $\eta_{ИУ}$, вносимого при вычислении относительной нейтронной мощности, получим передаточную функцию измерительного устройства в виде

$$W_{ИУ}(S) = e^{-S\eta_{ИУ}}. \qquad (10)$$

Исполнительный механизм принимает от регулирующего устройства квантованный (двухуровневый) составной сигнал. Если оба входа «Б», «М» находятся в неактивном состоянии, выходы ИМ удерживают все ОР регулирующей группы неподвижными. Если вход «М» («Б») ИМ находится в активном состоянии, на всех его выходах, соединенных с приводами регулирующей группы, формируются управляющие воздействия в виде последовательности импульсов, каждый из которых вызывает перемещение соответствующего ОР вниз (вверх) на величину $\Delta H_0 = 20$ мм. Импульсы выдаются одновременно на все приводы и повторяются с номинальной частотой $f_{ном} - 1$ Гц до тех пор, пока сохраняется активное состояние входа «М» («Б»).

Согласно [7, 8, 9] скорость введения положительной реактивности при извлечении группы ОР из активной зоны не должно превышать $0{,}07 \cdot \beta$ с$^{-1}$, где β – доля запаздывающих нейтронов.

Приняв для ВВЭР-1000 минимальное (возможное в конце кампании топливной загрузки) значение $\beta = 0{,}5\,\%$, максимальную эффективность рабочей группы $\Delta\rho_{\max} = 0{,}8\,\%$ [5], с учетом диапазона перемещения регулирующей группы 160 см, получим скорость введения положительной реактивности $\Delta\rho_{\max} \cdot \Delta H_{ном} \cdot f_{ном} / \Delta H_{\max} = 0{,}01\,\%$ с$^{-1}$, при допускаемой скорости 0,035% с$^{-1}$.

Как уже отмечалось в процессе регулирования должно выполняться условие $\Delta\rho << \beta$. При сравнительно небольшом значении $\Delta\rho_0$ можно считать, что ступенчатое перемещение ОР практически не отличается от непрерывного.

В этом случае скорость изменения выходной величины $H(t)$ постоянна и определяется следующими уравнениями:

- при активном состоянии входа «Б»:

$$\frac{\Delta H(t)}{d(t)} = \Delta H_0 \cdot f_{ном} = 20 \text{ мм/с};$$

- при активном состоянии входа «М»:

$$\frac{\Delta H(t)}{d(t)} = -\Delta H_0 \cdot f_{ном} = -20 \text{ мм/с};$$

- если оба входа не активны:

$$\frac{\Delta H(t)}{d(t)} = 0 \text{ мм/с} \cdot$$

Передаточную функцию ИМ можно представить в виде

$$W_{ИМ}(S) = \frac{\pm \Delta H_0 \cdot f_{ном}}{S} \qquad (11)$$

Регулирующее устройство вместе с ИМ реализует закон регулирования, который определяет зависимость управляющих воздействий на объект $H(t)$ от текущего ($P_{\%}$) и заданного ($P_{\%}$) значений управляемого параметра. Принятый закон обеспечивает устойчивость замкнутой системы регулирования при любых возмущениях.

В современных системах используют ИМ постоянной скорости с ШЭМ, а в регулирующем устройстве вместо усилителя применяют релейный элемент с квантованным выходным сигналом.

Команда «Б» («М») формируется регулирующим устройством и отрабатывается ИМ, изменяя нейтронную мощность. Выдача управляющего воздействия прекращается после того, как значение регулируемого параметра станет отличаться от заданного значения $P_{\%}$, менее, чем на половину ширины зоны нечувствительности. Введение зоны нечувствительности позволяет уменьшить частоту переключений ИМ в установившемся режиме.

Результаты эксперимента

Моделирование работы работы АРМ в режиме «Н» проводилось на тренажере с программным ядром ввиде программного комплекса «Простор», функционирующего на

базе платформы ЭНИКАД. Данный тренажер моделирует работу различных технологических систем и элементов оборудования АЭС.

При работе с многофункциональным компьютерным анализатором реактора ВВЭР-1000 исследовались характеристики АРМ в составе СУЗ реактора для режима работы «Н».

Проводилась проверка устойчивости работы АРМ при заданных параметрах регулятора в стационарных режимах на номинальной мощности.

Выполнялась проверка качества работы АРМ в переходных режимах при нормальной эксплуатации при заданных параметрах АРМ.

Предполагалось, что хорошим качеством работы регулятора АРМ в данном режиме является удержание интегральной нейтронной мощности в назначенных пределах регулирования при сохранении мощности турбогенератора в коридоре регулирования ±1.0% от номинальной электрической мощности, хотя удержание электрической мощности в указанном коридоре является вторичным критерием качества работы АРМ для такого режима.

Для действующих АЭС коридор регулирования по отклонению нейтронной мощности от уставки составляет величину, равную ±2%, штатная скорость движения ОР СУЗ равна 2см/сек.

Качество работы АРМ проверилось в соответствии со следующими критериями:

1. Число выходов за пределы назначенного коридора регулирования при различных возмущениях, возникающих в ЯЭУ по разным технологическим причинам.
2. Число выходов электрической мощности за пределы установленного коридора.
3. Количество передвижений ОР СУЗ для обеспечения нужного «коридора» управления по мощности.

На рисунке 5 показан фрагмент логической схемы одного из каналов АКНП с указанием устройств для работы АРМ в режиме «Н» [10]. На данном фрагменте схемы АРМ показаны параметры регулятора, которые варьировались в эксперименте.

Выходной сигнал компаратора с гистерезисом на больше (рис.6) формируется в результате сравнения сигнала на входе 1 с сигналом на входе 2, с учетом того, какой ветви петли гистерезиса, которая задана параметром HYS, соответствует состояние компаратора:

- - выход = вход1> вход2, если компаратор в состоянии F (False);
- - выход = вход1> вход2 - HYS, если компаратор в состоянии T (True).

Функциональный элемент (с гистерезисом на меньше) (рис. 7) функционирует следующим образом: выходной сигнал компаратора формируется в результате сравнения сигнала на входе 1 с сигналом на входе 2, с учетом того, какой ветви петли гистерезиса соответствует состояние компаратора:

- - выход = вход1< вход2, если компаратор в состоянии F (False);
- - выход = вход1< вход2 + HYS, если компаратор в состоянии T (True).

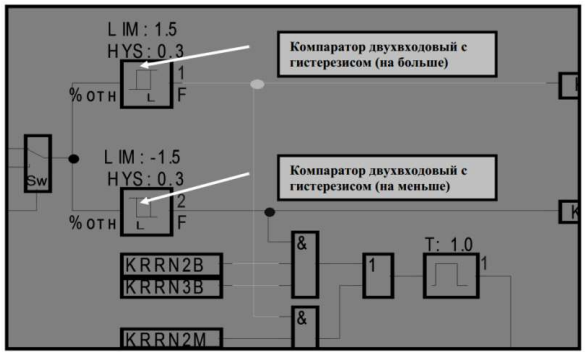


Рис. 5. Режим поддержания нейтронной мощности в заданном коридоре отклонений от установочного значения мощности по данному каналу.

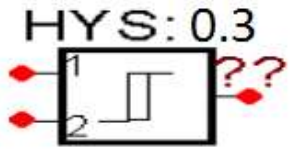


Рис. 6. Внешний вид элемента с гистерезисом на больше, показанный на схеме рис. 5 .

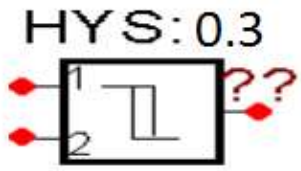
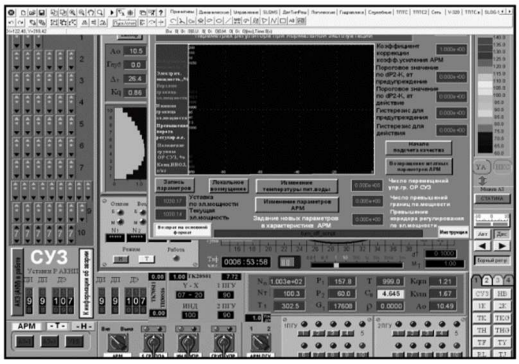


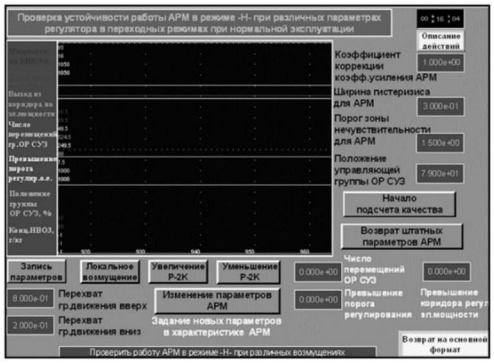
Рис. 7. Внешний вид элемента с гистерезисом на меньше, показанный на схеме рис. 5.

Для выполнения эксперимента использовались два рабочих формата, представленные на рисунке 8 [10].

Проверка устойчивости работы АРМ в режиме «Н» проводилась для назначенных групп значений параметров АРМ. Каждую группу составляют пороговое значение для действия Lim (от установленной мощности), ширина гистерезиса (HYS2 = HYS1), скорость перемещения ОР СУЗ.



а)



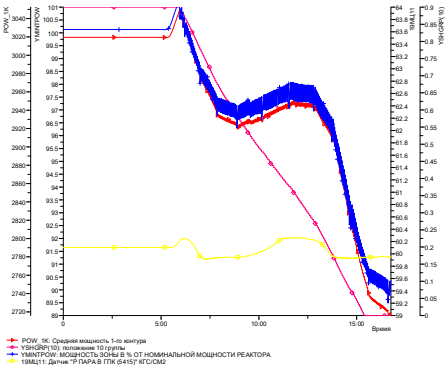
б)

Рис. 8. Рабочие форматы: графическая программная оболочка (а) и проверка устойчивости работы АРМ в режиме «Н».

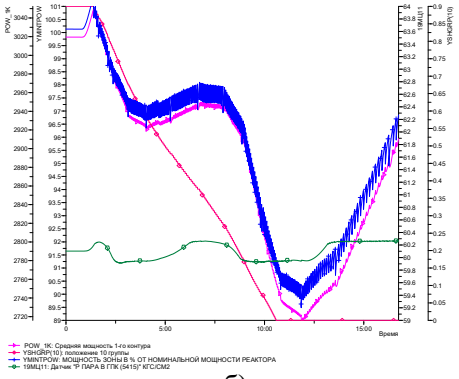
Устойчивость АРМ определяется визуально на рабочем формате (рис. 7, б), контролируется появление частичных колебаний в движениях ОР СУЗ (вверх – вниз) или колебаний нейтронной мощности при неизменном положении ОР СУЗ, что связано с работой ЭГСР в данном режиме поддержания постоянного давления 2-го контура, но спровоцированного работой АРМ. Возмущениями в данном случае являются изменение уставки по давлению во 2-ом контуре для регулятора ЭГСР в режиме РД1. Для имитации возмущений задействованы кнопки «Увеличение Р-2К», «Уменьшение Р-2К» (рис. 7, б).

После проверки устойчивости АРМ для режима «Н», проверяется работа качества АРМ по двум группам параметров с автоматизированной оценкой качества работы АРМ для тех же начальных состояний активной зоны. При проверке качества добавляется возмущение за счет движения одного ОР СУЗ.

Результаты экспериментальных исследований приведены на рисунке 9.



а)



б)

Рис. 9. Визуализация изменения нейтронной мощности в активной зоне и регистрируемой по БИК. Фиксация неустойчивой работы АРМ в режиме «Н».

Заключение

Таким образом, проведенные исследования устойчивости и качества работы АРМ в режиме «Н» показывают, что регулятор для заданных групп параметров (порогового значения для действия Lim (от установленной мощности), ширины гистерезиса (HYS2 = HYS1), скорости перемещения ОР СУЗ) не устойчив, поскольку при появлении возмущений, связанных с изменением давления во 2-ом контуре возникают колебания в движении ОР СУЗ. По качественным показателям работа регулятора, показанная на рисунке (рис. 9, а) лучше в сравнении с показа-

телями, представленными на рисунке (9, б). Поскольку предполагалось, что хорошим качеством работы регулятора АРМ в данном режиме является удержание интегральной нейтронной мощности в коридоре ±2% при сохранении мощности турбогенератора в коридоре регулирования ±1.0% от номинальной электрической мощности. В двух вариантах, представленных графиков, АРМ удерживает нейтронную мощность в заданном коридоре, но в случае рисунка (9, б) количество перемещений ОР СУЗ больше.

Список литературы

1. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС – Автоматизированные системы управления АЭС. Режим доступа: https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/avtomaticheskoe-upravlenie-i-zaschita-teploenergeticheskih-ustanovok-aes-2.html.
2. Плютинский, В.И. Автоматическое управление и защита теплоэнергетических установок АЭС / В.И. Плютинский, В.И. Погорелов.-М.: Энергоатомиздат, 1983. -295с.
3. Ястребенецкий М. А. Безопасность атомных станций. Системы управления и защиты ядерных реакторов / М. А. Ястребенецкий, Ю. В. Розен и др.-К.: Основа-Принт, 2011. -768с.
4. Основы автоматического регулирования. Теория / Под ред. В. В. Солодовникова.-М.: Машгиз, 1954.-116 с.
5. Горохов, А.К. Обоснование нейтронно-физической и радиационной частей проектов ВВЭР / А.К. Горохов, Ю.Г. Драгунов, Г.Л. Лунин и др.-М.:ИКЦ «Академкнига», 2004. -496с.
6. Система управления и защиты. Описание алгоритмов автоматического регулирования мощности. 392М.12 Д2, ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2008.
7. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций. НП-082-07, Москва, 2007.
8. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97, НП-001-97 (ПНАЭ Г-01- 011-97), Москва, 1997.
9. Комплекс электрооборудования системы управления и защиты реактора ВВЭР-1200 (В-392М) Нововоронежская АЭС-2. Количественный анализ надежности электрооборудования. Технический отчет. ТАИК.500076.076, НПП ВНИИЭМ, 2009.
10. Описание лабораторного практикума. Методические указания к выполнению лабораторных работ. МАГАТЭ - НИЯУ МИФИ. Кафедра «Автоматика».Том 4. Книга 1, Москва, 2013.

References

1. *Avtomaticheskoe upravlenie i zashchita teploenergeticheskikh ustanovok AES – Avtomatizirovannye sistemy upravleniya AES.* [Automatic control and protection of nuclear power plants. Automated control systems of nuclear power plants.] Режим доступа: https://leg.co.ua/arhiv/generaciya/avtomaticheskoe-upravlenie-i-zaschita-teploenergeticheskih-ustanovok-aes-2.html.
2. Plyutinskiy V.I., Pogorelov V.I. *Avtomaticheskoe upravlenie i zashchita teploenergeticheskikh ustanovok AES* [Automatic control and protection of nuclear power plants.]. Moskow: Energoizdat, 1983, 295 p.
3. Yastrebenetskiy M. A. *Bezopasnost atomtykh stantsiy. Sistemy upravleniya i zashchity yadernikh reaktorov [Safety of nuclear power plants. Nuclear reactor control and protection systems*]. Kiev, Osnova-Print, 2011, 768 p.
4. Solodovnikov V.V. *Osnovy avtomaticheskogo regulirovaniya. Teoriya*. [Basics of automatic control. Theory.]. Moskow, Mashgiz, 1954, 116 p.
5. Gorokhov, A.K., Lunin G.L. *Obosnovanie neytronno-fizicheskoy i radiatsionnoy chastey proektov VVER. [Justification of neutron-physical and radiation parts of WWER projects*.]. Moskow, IKTS «Akademkniga», 2004, 496p.
6. *Sistema upravleniya i zashchity. Opisanie algoritmov avtomaticheskogo regulirovaniya moshchnosti. 392M.12 Д2.* [Control and protection system. Description of automatic power control algorithms.]. Moskow, OKB «GIDROPRESS», 2008.
7. *Pravila yadernoy bezopasnosty reaktornikh ustanovok atomnokh stantsiy. NP-082-07* [Rules of nuclear safety of reactor installations of nuclear power plants. NP-082-07]. Moskow, 2007.
8. *Obshchie polozheniya obespecheniya atomnikh stantsiy. OPB-88/97, NP-001-97 (PNAEG-01- 011-97)* [General provisions of safety of nuclear power plants. OPB 88/97, NP 001-97], Moskow, 1997.
9. *Kompleks elektrooborudovaniya Sistemy upravleniya i zashchity reaktora VVER -1200 (V-392M) Novovoronezhskaya AES-2. Kolichestvenniy analiz nadezhnosti elektrooborudovaniya. Tekhicheskiy otchet. TAIK.500076.076, NPP VNIIEM* [Complex of electrical equipment of the control and protection system of the reactor WWER-1200 (V-392M) Novovoronezh NPP-2. Quantitative analysis of electrical equipment reliability. Technical report. TAIK.500076.076, NCE URRIEM], 2009.
10. *Opisanie laboratornogo praktikuma. Metodicheskie ukazaniya k vypolneniyu laboratornikh rabot. MAGATE - NIYAU MIFI. Kafedra «Avtomatika». Tom 4. Kniga 1* [Description of the laboratory workshop. Methodical instructions to performance of laboratory works. IAEA- RYAU MIPHI. Department Of "Automation".Volume 4. Book 1], Moskow, 2013.

УДК 621.311.6.03

Автоматизация учета электроэнергии на предприятии как элемент энергосбережения

О.Н. Титаренко [1], Н.А. Тимофти[2]
[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет Университетская-33»*
[2]*г. Севастополь, 299053, Россия*

Статья поступила 24.10.2019 г.; после доработки 28.10.2019 г.

Аннотация

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

Ключевые слова: качество электроэнергии, автоматизированная система коммерческого учета, энергосбережение, качество электроэнергии.

Automation of electricity metering in the enterprise as the energy saving element

O.N.Titarenko[1], N.A.Timofti[2]
[1] *FAEI HE «Sevastopol state University, 33 Universitetskaya st»*
[2] *Sevastopol, 299053, Russia*

Received 24.10.2019 y.; received in final form 28.10.2019 y.

Abstract

The purpose of this article is to substantiate the relevance of using an automated system of accounting and control of electricity to improve power quality and accuracy of its accounting. In the article automation of electricity metering is considered as one of the main ways of energy saving.

Keywords: quality of electric power, automated system of commercial accounting, energy saving, quality of electric power.

Введение

Энергосбережение на промышленных предприятиях возможно только при наличии достоверной информации о количестве потребляемой предприятием электрической энергии.

В этой связи особое значение приобретает организация эффективного энергоучета. Его основной целью является точное определение уровня потребления энергии предприятием в целом и его отдельными подразделениями. Это позволяет сделать максимально прозрачными взаимоотношения с поставщиками энергоресурсов.

Кроме того, учет электроэнергии на предприятии дает возможность выявлять проблемные участки и технологические цепочки, где осуществляется неоправданно высокое потребление энергии.

Это позволяет разрабатывать и реализовывать мероприятия по энергосбережению, а также оценивать их эффективность.

Вопросы, связанные с уменьшением потерь электроэнергии и точностью ее учета, приобретают все большую актуальность.

Решение этих вопросов предполагает при-

менение автоматизированной системы коммерческого учета электроэнергии как необходимого звена для функционирования электроэнергетики.

Учет электроэнергии на предприятии

По своему предназначению автоматизированные системы учета электроэнергии делятся на системы коммерческого учета и системы технического учета электроэнергии на предприятии.

Коммерческий учет электроэнергии на предприятии подразумевает учет поставки и потребления электроэнергии каждым конкретным предприятием для осуществления последующего денежного расчета за нее.

Технический учет электроэнергии или, так называемый, контрольный учет подразумевает учет электроэнергии для контроля процесса ее поставки и потребления внутри отдельного производства для обеспечения потребностей каждого конкретного производственного объекта и подразделения.

Каждый из данных видов учета электроэнергии имеет свои специфические особенности, в частности коммерческий учет предусматривает наличие устоявшейся можно сказать консервативной схемы электроснабжения и характеризуется небольшим количеством учетных точек, предусматривающих переустановку приборов повышенной точности.

Автоматизация коммерческого учета электроэнергии является важной составляющей всей системы энергосбережения на предприятии.

Структура АСКУЭ

АСКУЭ — это автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии, которая обеспечивает дистанционный сбор информации с интеллектуальных приборов учета, передачу этой информации на верхний уровень, с последующей ее обработкой. Создание АСКУЭ позволяет автоматизировать учет, и добиться его максимальной точности. Также система учета электроэнергии дает возможность получать ценную информацию аналитического характера, необходимую для разработки действенных решений по энергосбережению.

Автоматическая система учета электроэнергии АСКУЭ имеет сложную иерархическую структуру, которая состоит из трех уровней (рис.1):

- **Нижний уровень**. Первичные измерители — интеллектуальные счетчики электроэнергии, обеспечивающие непрерывное измерение параметров и передачу данных на следующий уровень.
- **Средний уровень**. Среда передачи данных, состоящая из устройств сбора и передачи данных (УСПД), которые обеспечивают непрерывный опрос измерителей, получая от них данные учета. Далее информация передается на верхний уровень.
- **Верхний уровень** представляет центральный узел сбор данных, на сервера которого поступает информация со всех локальных УСПД. Связь обеспечивается специальным протоколом по высокоскоростному каналу передачи данных. На верхнем уровне применяется специальное программное обеспечение, позволяющее визуализировать полученные данные и осуществлять их анализ и подготовку отчетных документов.

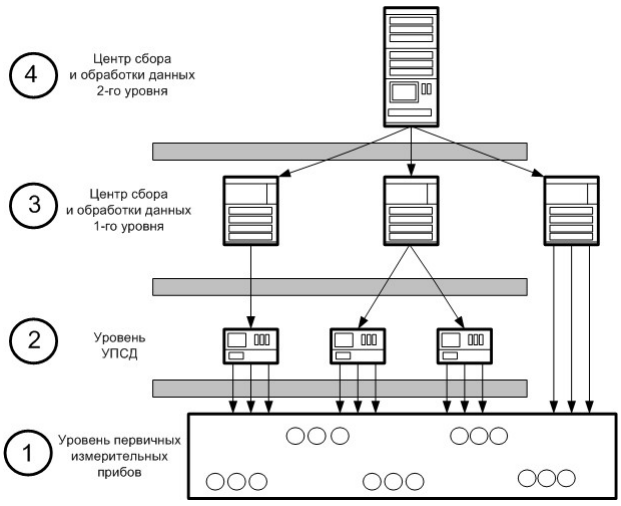


Рис. 1. Структура АСКУЭ в графическом изображении.

Функции и возможности АСКУЭ

Требования к АСКУЭ определяются «Основными положениями функционирования розничных рынков электроэнергии» (утверждены Постановлением Правительства РФ от 04 мая 2012 года № 442).

Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии обеспечивают выполнение следующих основных функций:

- непрерывный автоматический сбор данных с приборов учета и их отправка на сервер;
- постоянное накопление и хранение данных за прошлые периоды;

- анализ информации об энергопотреблении на предприятии, позволяющий обеспечить его оптимизацию;
- выявление несанкционированных подключений к сети энергоснабжения на предприятии;
- удаленное подключение и отключение от сети конечных потребителей.

АСКУЭ промышленных предприятий позволяют обеспечить максимальную точность учета и прозрачность расчетов с поставщиками электроэнергии. Кроме того, внедрение АСКУЭ открывает широкие возможности экономии электроэнергии.

Организация автоматизированного учета электроэнергии на предприятиях России

Системы АСКУЭ состоят из отдельных компонентов. Это технические средства (счетчики, телеметрическое оборудование, УСПД, вычислительные средства) и программное обеспечение. Составляющие системы производятся и создаются различными отечественными компаниями.

В настоящее время предприятия Российской федерации производят широкую гамму трехфазных электронных и микропроцессорных электросчетчиков, позволяющих использовать их в системах АСКУЭ. Основными изготовителями являются: ОАО «Концерн Энергомера» (г. Ставрополь), СП АББ-ВЭИ «Метроника» (г. Москва), Мытищинский электротехнический завод (Московская обл.), Нижегородский завод им. Фрунзе, Государственный Рязанский приборный завод.

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

Основными комплексами АСКУЭ использующимися в России являются:

- «Альфа-СМАРТ»;
- «Ресурс»;
- «КТС «Энергия».

Комплекс технических средств (КТС) «Энергия» - единственный в РФ комплекс, обеспечивающий единую техническую и программную платформу для построения автоматизированных информационно-измерительных систем (АИИС).

«Альфа-СМАРТ» на российском рынке начал использоваться в первую очередь на Колэнерго, а именно на Кольской АЭС, что за два года позволило достичь следующих результатов:

- Объём и достоверность получаемой информации о перетоках электроэнергии в системе АСКУЭ соответствует требованиям нормативных документов;
- Выходные формы АСКУЭ удовлетворяют требованиям пользователей Колэнерго;
- Организован межмашинный обмен информацией о межгосударственных перетоках между Колэнерго и ОДУ "Северо-Запада" по коммутируемым каналам.

Комплекс «Ресурс» является самым распространенным в России, только за 2018 год в Москве было зарегистрировано 28 реализованных проектов

Использование АСКУЭ как элемента энергосбережения

Постоянное удорожание энергоресурсов требует от промышленных предприятий разработки и внедрения комплекса мероприятий по энергосбережению, включающих жесткий контроль поставки/потребления всех видов энергоресурсов, ограничение и снижение их доли в себестоимости продукции.

Внедрение АСКУЭ на предприятии позволяет обеспечить точный автоматизированный учет потребления энергоресурсов и дает аналитическую информацию, позволяющую экономически обоснованно разрабатывать, осуществлять комплекс мероприятий по энергосбережению, своевременно его корректировать, обеспечивая динамическую оптимизацию затрат на энергоресурсы в условиях изменяющейся экономической среды (Рис. 2).

Опыт внедрения АСКУЭ в электроэнергетике показывает, что только автоматизация коммерческого учета потребления электроэнергии с введением многозонных тарифов дает экономию до 30 %.

Внедрение технических АСКУЭ дает реальный инструмент, позволяющий разработать мероприятия по энергосбережению:

- вести постоянный круглосуточный контроль за соблюдением заданного потребления энергии, мощности и балансов энергии и других энергоресурсов;
- определить критические временные интервалы потребления энергии и мощности отдельным структурным подразделениям и по

предприятию в целом;
- провести анализ нагрузок по тарифным зонам и рабочим сменам предприятия и определить непроизводственные потери энергии;
- вести контроль за соблюдением заданного режима работы компенсирующих устройств;
- определить методы снижения заявленной мощности и потребления электроэнергии;
- разработать оптимальный режим работы электрооборудования.

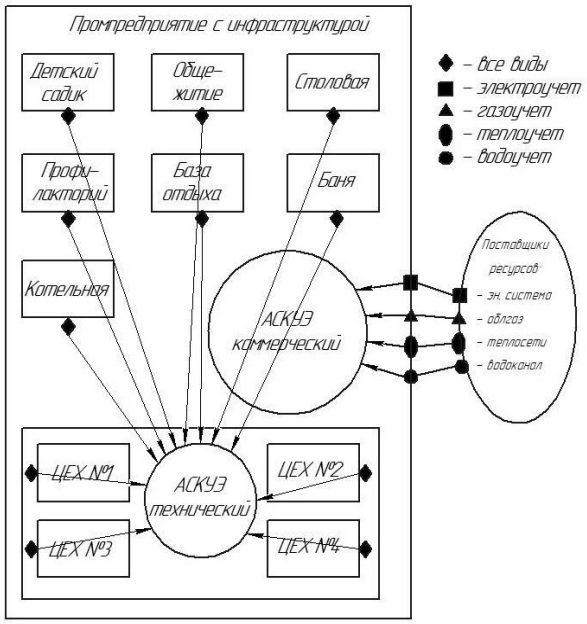


Рис. 2. АСКУЭ коммерческого и технического учета промпредприятия.

Для эффективного использования АСКУЭ рекомендуется провести следующие технические мероприятия:
- С помощью АСКУЭ получить графики потребления электроэнергии и мощности по тарифным зонам и рабочим сменам структурными подразделениями и предприятием в целом (рекомендуемый период 2–3 месяца).
- Определить максимальные, минимальные и средние значения потребления электроэнергии и мощности структурными подразделениями и предприятием в целом.
- Составить перечень электрооборудования каждого структурного подразделения с их номинальным потреблением мощности (электроэнергии).
- Составить временной график работы электрооборудования на планируемый период с учетом тарифных зон и рабочих смен.
- Исходя из расчетных данных, полученных с помощью АСКУЭ, определить по временному графику критические точки потребления электроэнергии и мощности.

Экономия электроэнергии за счет установки АСКУЭ и проведения энергосберегающих мероприятий позволит окупить затраты на внедрение системы в течение 1–4 месяцев и подготовить условия для заключения договора с энергоснабжающей организацией об оплате за договорную мощность по фактическому потреблению и введению многотарифной системы оплаты за использованную энергию. Все это можно применить для учета и других энергоносителей – пар, горячая и холодная вода, газ, что позволяет создать единую систему учета потребления энергоносителей на предприятии.

Заключение

Система АСКУЭ позволяет получить полную картину энергопотребления и распределения энергоресурсов, создает инвестиционную привлекательность предприятия и предоставляет возможность решить весь комплекс задач по оптимизации энергоснабжения объектов. Автоматизированная система коммерческого учета электроэнергии является важным изобретением нашего века, ведь она осуществляет своевременный учет расхода электроэнергии, позволяет производить отслеживание технического состояния и выявление неисправных счетчиков электроэнергии.

Современная АСКУЭ является измерительным инструментом, позволяющим экономически обоснованно разрабатывать, осуществлять комплекс мероприятий по энергосбережению, своевременно его корректировать, обеспечивая динамическую оптимизацию затрат на энергоресурсы в условиях изменяющейся экономической среды.

Список литературы

1. Воротницкий В.Э. Снижение потерь электроэнергии - важнейший путь энергосбережения в электрических сетях // Энергосбережение. – 2 014. -№ 3. - С. 61-64.
2. Прошин И.А. Автоматизация учета электрической энергии как средство повышения энергетической эффективности // Технические науки - от теории к практике: сб. ст. по матер. XXXIII

междунар. науч.-практ. конф. № 4(29). – Новосибирск: СибАК, 2014
3. Савельева Е.В. Автоматизированные системы контроля и учёта электрической энергии – решение проблемы управления энергопотреблением [Текст] / Е.В. Савельева // Young science. – 2014. – №2. – С. 48-51.
4. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть - новое качество ЕЭС России // Энергоэксперт. - 2009. - №4. - С. 28-34.

References

1. Vorotnitsky V. E. Reduction of electric power losses - the most important way of energy saving in electric networks. - 2014. - No. 3. Pp. 61-64.
2. Proshin I. A. automation of electric energy accounting as a means of increasing energy efficiency / / Technical Sciences - from theory to practice: sat. St. po mater. XXXIII international. science.- pract. Conf. No. 4 (29). - Novosibirsk: Sibak, 2014
3. Savelyeva E. V. Automated systems of control and accounting of electric energy-a solution to the problem of energy management [Text] / E. V. Savelyeva / / Young science. - 2014. - No. 2. Pp. 48-51.
4. Dorofeev V. V., Makarov A. A. Active-adaptive network-new quality of UES of Russia / / Energoexpert. - 2009. - No. 4. - Pp. 28-34.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 620.92

Использование фотоэлектрических систем для электрообеспечения портовых сооружений

В.В. Кувшинов[1], Е.Г. Какушина[2], И.С. Ивантеев[3], С.А.Абейдулин[4]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, [1]*kuvshinov.vladimir@gmail.com,* [2]*littie@mail.ru*, [3]*ivantyeyevjonik@rambler.ru,*[4]*abeidylin@mail.ru*

Статья поступила 14.11.2019 г.; после доработки 19.11.2019 г.

Аннотация

Рассматривается возможность использования солнечной электростанции для обеспечения нужд портовых сооружений. Результаты показывают, что выработанную энергию возможно использовать для обеспечения маломощного электрооборудования портовых сооружений.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, электрообеспечения автономных потребителей, солнечная электростанция, портовые сооружения

Using a combined thermophotovoltaic system for an autonomous consumer

V.V. Kuvshjnov[1], E.G. Kakyshina[2], I.S. Ivantyeyev[3] , S.A. Abeydulin[4]
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]*kuvshinov.vladimir@gmail.com,* [2]*littie@mail.ru*, [3]*ivantyeyevjonik@rambler.ru,*[4]*abeidylin@mail.ru*

Received 14.11.2019 y.; received in final form 19.11.2019 y.

Abstract

The possibility of using a solar power station to meet the needs of port facilities is being considered. The results show that the generated energy can be used to provide low-power electrical equipment at port facilities.

Keywords: photovoltaic module, power supply for autonomous consumers, solar power station, port facilities.

Введение

Солнце является независимым, постоянным источником энергии, излучающаяся энергию в виде потока фотонов в широком спектре излучения. С открытием внутреннего фотоэффекта было положено начало солнечной электроэнергетике.

В современной России особое внимание уделяется электроэнергетическому комплексу.

Последние тенденции в энергетике направлены на развитие нетрадиционных источников энергии. Солнце как нетрадиционный источник энергии обладает рядом достоинств и недостатками.

Достоинства потока солнечной радиации – это мощный, неиссякаемый (в отличии от земных полезных ископаемых) источник электрической и тепловой энергии настоящего и будущего, экологически чистый, доступный.

К недостаткам можно отнести неравномерность выработки энергии в течении суток и вре-

мени года, старение солнечных модулей, необходимость использование аккумуляторов для хранения полученной электрической энергии.

Крымский полуостров обладаем благоприятными условиями для использования энергии солнца [13].

Постановка задачи исследования

В данной работе особое внимание уделяется сбору солнечной электростанции (СЭС) на основе которой определяется выработка электроэнергии в зависимости от времени суток.

На основе полученных данных оценивается электро-потенциал солнечной станции применительно к городу Севастополю.

Определятся потенциально востребованные направления, для использования портовыми сооружениями, полученной солнечной электроэнергии.

Для изучения поставленной темы раздели ее на части:

- рассмотрение наиболее распространенных типы солнечных модулей (явление внутреннего фотоэффекта);
- рассмотрение наиболее распространенных типов аккумуляторных батарей (АКБ), определение их достоинств и недостатков;
- рассмотрение наиболее распространенных типов солнечных инверторов и определение их достоинств и недостатков;
- на основе рассмотренной выше информации разработка солнечной электростанции;
- проанализируем полученную информацию.

Внутренним фотоэффектом называется явление увеличения концентрации носителей заряда в веществе, а, следовательно, и увеличения электропроводности вещества под действием света [14].

Частным случаем внутреннего фотоэффекта является вентильный фотоэффект — явление возникновения под действием света электродвижущей силы в контакте двух различных полупроводников или полупроводника и металла.

На текущий момент наиболее широкое распространение получили следующие типы солнечных модулей: монокристаллические, поликристаллические, аморфные [6].

При выборе типов АКБ обращаем внимание на следующие параметры [3]: ресурс циклов «заряда-разряда», показатель скорости процесса зарядки и разряда, показатель саморазряда АКБ, объем емкости аккумулятора, максимальное значение тока при заряде и разряде, вес и габариты устройства, обслуживание.

На рынке для солнечных электростанций представлены следующие типы АКБ.

Кислотные (автомобильные аккумуляторы). Достоинства: дешевизна, большая емкость. Недостатки: автомобильные АКБ ориентированы на короткий разряд и быструю подзарядку до полной емкости (срок службы 2-3 года).

Щелочные аккумуляторы. Достоинства: предназначены для циклической работы, что оптимально для работы электростанции, способны выдавать всю электроэнергию до полного разряда, срок службы щелочных АКБ около 20 лет. Недостатки: наличие контролера заряда для оптимального процесса зарядка, высокая стоимость.

Гелиевые аккумуляторы (свинцово-кислотные) Достоинства: высокая эффективность, срок службы около 10 лет, практически не требуют обслуживания. Недостатки**:** высокая стоимость.

Литий-ионные аккумуляторы (литий-железо-фосфатные) Достоинства: срок службы около 15 лет, отличаются от других стабильностью напряжения, безопасность использования. Недостатки**:** высокая стоимость [8].

На сегодняшний день широкое применение получили три вида инверторов: сетевые, автономные и гибридные.

Сетевые инверторы предназначены для работы совместно с централизованным электроснабжением, контролирует напряжение и частоту тока внешней сети, и может передавать лишнее электричество в основную электросеть.

Автономные инверторы предназначены для работы автономно от сети и поступление к потребителям электроэнергии.

Устройства данного вида преобразуют накопленную в АКБ энергию до требуемых параметров и направляют ее для дальнейшего использования.

Гибридный инверторы включает в себя функции сетевого и автономного вида.

Многофункциональный тип инвертора подходит для домашней, и для промышленной солнечной станции. Возможно, параллельно питать нагрузку из сети и от аккумуляторной батареи [8].

Современные гибридные инверторы являются наиболее перспективным видом.

Достоинствами является возможность параллельного подключение инверторов на общую нагрузку, использование интерфейсов, использование трехфазных инверторов.

Наличие интерфейсов RS 232 и USB для подключения компьютера как для контроля и от-

слеживания параметров, что позволяет оперативно отслеживать и производить диспетчерский контроль в системах с микрогенерацией.

Последнее немаловажно для построения диспетчеризации интеллектуальных систем электроснабжения, поскольку с 2009 года правительством РФ утвердило на государственном уровне политику повышения энергетической эффективности электроэнергетике на основе использования возобновляемых источниках энергии.

Исходя из вышесказанного было принято использовать для создания СЭС следующие элементы:

1. Солнечные панели ФСМ-100М в количестве 6 штук фирмы ООО «Эксморк» со следующими техническими характеристиками.

Номинальная мощность: 100 Вт (0 ~ +6Вт). Напряжение при пиковой мощности (Vmax): 17.79 В. Напряжение холостого хода (Voc): 21.82 В. Ток короткого замыкания (Isc): 5.99 А. Ток при пиковой мощности (Imax): 5.62 А. максимальное напряжение в системе (VDC): 1000 В. Коннектор: MC4. Размер (ДхШхГ): 1200 x 540 x 35 мм. Вес: 8.25 кг. Температура эксплуатации: -40 ~ +85°C Степень герметизации - IP 65 (герметизированный корпус для эксплуатации на улице). Гарантия на солнечные модули Exmork - 10 лет. Срок службы - не менее 30 лет Мощность в течение 30-ти лет: 2 года не менее 100% мощности, 10 лет - не менее 90% мощности, 25 лет - не менее 80% мощности [12].

2. Сетевой инвертор MPP SOLAR PIP 2424ms в количестве 1 штука, со следующими техническими параметрами:

- Входное напряжение 90-280 В;
- Входная /выходная частота 50 Гц;
- Выходное напряжение 230В +-5%;
- КПД 93%;
- Номинальное значение напряжения от батарей 24 В;
- Максимальное значение напряжения от батарей 31 В;
- Максимальная мощность от солнечных панелей 600 Ватт;
- Максимальное напряжение от солнечных панелей 75 В.

3. Автомобильные кислотные аккумуляторы-2 шт.

АКБ с параметрами: 12В 132АН соединенные последовательно.

Полученная структурная схема представлена на рисунке 1.

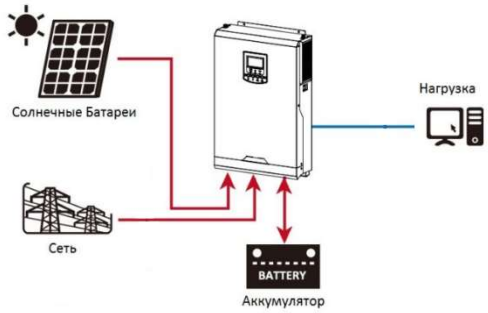


Рис.1. Структурная схема солнечной станции.

Результаты исследования

Применительно к городу Севастополю в ноябре месяце, с 8 до 10 утра панели развивают 30-80 % номинальной мощности, с 10 утра до 14 00 составляют 80-90 (95) % номинальной мощности, (отсутствие 100% мощности объясняется температурным коэффициентом, то есть зависимостью воль-амперной характеристики от температуры нагрева панелей), с 14 00 до 16 00 дня 90-40 % номинальной мощности, с 16 00- 17 00 дня 40-5%. Полученная неравномерность выработки энергии объясняется местом опытной установки солнечных панелей [1].

В используемом инверторе предусмотрены следующие режимы работы:

- Нагрузка питается от солнечных панелей, в случае нехватки мощности, получаемой от солнечных панелей, инвертер питается от АКБ. переключение на сеть происходит при разряде АКБ ниже установки переключения.
- Нагрузка питается от солнечных панелей, в случае нехватки мощности, получаемой от солнечных панелей, инвертер питается от АКБ. Переключение на сеть происходит при разряде АКБ ниже установки переключения или отсутствии солнечных панелей.
- Нагрузка питается от сети, и переключение на солнечные панели и АКБ происходит в случае потери напряжения в сети.

Исходя из полученных данных, применительно для портовых сооружений можно определить 3 перспективных направления:

- системы с суточной постоянной характером потребления. Такими системами могут быть пожарная сигнализация, система видеонаблюдения и т.д. Для этих систем расчет мощности и количество элементов СЭС может быть произведен с высоко точностью, поскольку динамика потребления практические неизменна от времени суток и времени

года [2], ввиду этого отсутствует необходимость пред усмотрения дополнительного запаса емкости АКБ и солнечных панелей на суточную динамику нагрузки;

– системы с мало переменным характером потребления. Такими системами выступают компьютерная, офисная техника, освещение. Характеризуется мало переменным характером потребления, для расчета СЭС таких систем требуется иметь точный график суточной нагрузки. При расчете к основной мощности СЭС необходимо добавить запас мощности, величина которой зависит от изменения потребления от времени года и количества дней в году с неблагоприятными погодными условиями;
– системы заряда АКБ. В качестве таких систем могут выступать системы заряда АКБ различного рода потребителей, например, для электротранспорта (тяговые АКБ). Данном примере возможны два варианта: имеет место быть сменные АКБ для зарядки в светлое время суток или накопитель большой емкости для накапливания заряда в светлое время суток с последующей отдачей в ночное время с помощью контролера заряда (АКБ инвертора-контролер заряда – АКБ накопителя энергии).

Системы неизменного и малоизменённого характера нагрузки при наличии возможности целесообразно объединять в общую сеть с целью повышения мощности и надежности энергообеспечения.

Немаловажную роль необходимо уделить топологии подключения инверторов (параллельной работы).

При наличии в инверторах интерфейса приема и передачи данных с компьютером позволит эффективно решать вопросы диспетчеризации.

Для систем заряда АКБ, важную роль играет стоимость АКБ (половину стоимости СЭС), ввиду этого требуется использовать их максимально приближенно и идеальным условиям, описанных в инструкциях по эксплуатации для увеличения срока службы.

Опытные данные зависимости заряда кислотных АКБ [4] представлены на рисунке 2.

Исходя из рисунка 2 видно, что за 12 часов зарядки АКБ наберет 95% емкости. Другим важным параметром является число циклов поскольку, исходя, из них будет рассчитываться окупаемость и амортизационные отчисления на АКБ.

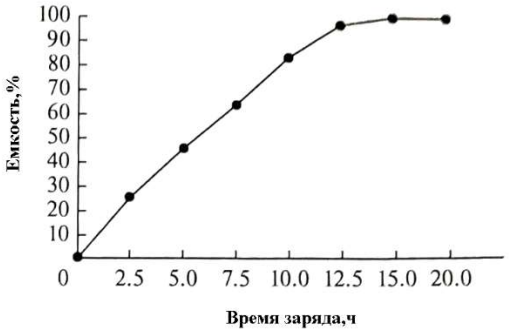


Рис.2. Зависимость емкости заряда свинцовых АКБ от времени заряда.

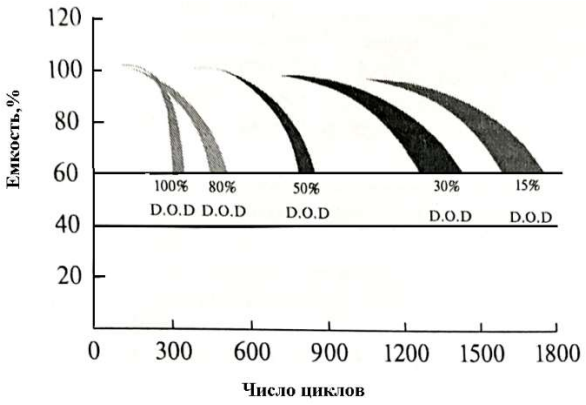


Рис.3. Зависимость количества циклов от степени разряда свинцовых АКБ.

Для системы солнечного электроснабжения основным генератором является фотоэлектрическая батарея (модуль) (рис. 1).

При проведении экспериментов использовался модуль PS-250, состоящий из поликремневых солнечных элементов (рис. 4).

Экспериментальные значения характеристик модуля были получены при различных температурных показателях в разное время года при одинаковой освещенности (около 950 Вт/м^2).

На графиках видно, что при одинаковых значениях освещенности, мощность модуля увеличивается при низких температурах, также изменяется форма мощностной характеристики.

При движении солнца по небосводу угол падения лучей на плоскую поверхность, установленную под углом, постоянно меняется в течение суток [5,6,7].

Ориентировав модуль перпендикулярно солнечным лучам, и изменяя его угол наклона к горизонту, можно имитировать работу модуля в зависимости от изменения угла падения солнечных лучей на его поверхность.

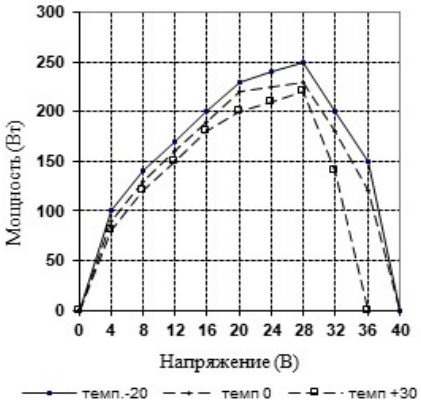


Рис.3.1. Мощностные характеристики модуля PS-250.

Коэффициент преобразования модуля, в зависимости от освещенности, улучшается в холодную ясную погоду, особенно эффективно работал модуль в январе при Т = – 20°С, и снижается в летние месяцы при повышении температуры рабочей поверхности.

Как видно из результатов, наилучший режим работы модуля наблюдался при отрицательных температурах (например – 20ºС, январь 2019) [9,10]. При этом температурные показатели также влияют на характеристики АКБ.

Холодная температура воздуха положительно сказывается на работе модуля, причем хорошо видно увеличение коэффициента преобразования модуля, в отличие от плюсовых температур.

Однако низкие температуры негативно влияют на характеристики аккумуляторов. Следовательно, АКБ необходимо располагать в теплых помещениях.

Выводы

Проведенное исследование показывает, что возможность проектирования СЭС для портовых сооружений следует проводить к заранее определенным потребителям, исходя из которых, подбирается тип и количество панелей, АКБ, инверторов, топология подсоединения и мониторинга параметров.

При подборе фотоэлектрических модулей, для системы обеспечения портового электрооборудования, необходимо знать их рабочие характеристики в разные месяцы года и проводить соответствующий подбор вспомогательного оборудования и АКБ.

Использование автономных систем для обеспечения портовых сооружений позволяет мобильно оснащать небольшие малогабаритные комплексы для погрузок и обеспечения других нужд [11].

Оснащение системами солнечного электроснабжения портовых комплексов Севастополя позволяет экономить традиционные энергоресурсы и значительно уменьшить вредные выбросы в курортном регионе.

Список литературы

1. Kuvshinov, V.V. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance. /Abd Ali, L.M., Kakushina, E.G., Krit B.L., Morozova, N.V., Kuvshinova, V.V//. Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika) Publisher: Pleiades Publishing. 2019. Vol. 55 No 4. P. 223-228.
2. Vologdin, S.V. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta. /Yakimovich, B.A., Kuvshinov, V.V., Abd Ali, L.M., Kakushina, E.G., Al Barmani, A.G., Al-Rufaee, F.M. Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika) Publisher: Pleiades Publishing. 2019 Vol. 55 No 4. P. 229-234.
3. Гурьев В.В. Развитие возобновляемых источников электроэнергии в энергосистеме республики крым и г. Севастополя / Какушина Е.Г., Якимович Б.А., Кувшинов В.В.//Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 2. С. 90-93.
4. Кувшинов В.В. Исследование режимов работы термофотоэлектрических установок/ Кувшинов В.В., Какушина Е.Г., Парахнич С.А., Буланов А.И. // Энергетические установки и технологии. 2018. Т. 4. № 1. С. 95-99.
5. Кувшинов В.В. Использование фотоэлектрической установки для обеспечения бесперебойной работы автономных потребителей /Е.Г. Какушина, Д.А. Чванова// Энергетические установки и технологии – 2016. Т. 2. № 1. С. 62-67.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Кувшинов В.В. Прозрачные защитные покрытия для комбинированных солнечных установок/ Е.Г. Какушина, Косий А.Г.// Энергетические

установки и технологии – 2017. Т. 3. № 3. С. 73-78.
10. Кувшинов В.В. Сравнение теоретических и экспериментальных результатов исследования характеристик фотоэлектрических батарей при изменении освещенности их рабочей поверхности. /Какушина Е.Г., Васильченко М.А., Киндлер В.В., Кувшинова В.В.// Энергетические установки и технологии - 2019. Т. 5. № 1. С. 81-86.
11. 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.
12. 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.
13. Кувшинов В.В. Обеспечение энергонезависимости Крымского полуострова при использовании автономных термофотоэлектрических станций. /Какушина Е.Г., Хайбулаев Э.Л., Решетняк В.В.// В сборнике: Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность - 2018 сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. под ред. Л. И. Лукиной, Н. А. Бежина, Н. В. Ляминой. Севастополь, 2018. С. 643-647.
14. Kuvshinov V.V. Storage System for Solar Plants. /Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. (Erratum Kakushina E.G.), Abd Alia L.M., Kuvshinova V.V. Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika) Publisher: Pleiades Publishing. 2019 Vol. 55 No 3. P. 153-158.

References

1. Kuvshinov, V.V. Studies of the PV Array Characteristics with Changing Array Surface Irradiance. /Abd Ali, L.M., Kakushina, E.G., Krit B.L., Morozova, N.V., Kuvshinova, V.V//. Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika) Publisher: Pleiades Publishing. 2019. Vol. 55 No 4. P. 223-228.
2. Vologdin, S.V. Analysis of Various Energy Supply Scenarios of Crimea with Allowance for Operating Modes of Solar Power Planta. /Yakimovich, B.A., Kuvshinov, V.V., Abd Ali, L.M., Kakushina, E.G., Al Barmani, A.G., Al-Rufaee, F.M. Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika) Publisher: Pleiades Publishing. 2019 Vol. 55 No 4. P.
3. Guryev V.V. Development of renewable energy sources in the power 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.T. 5. No. 2. P. 90-93.
4. Kuvshinov V.V. Investigation of operating modes of thermophotovoltaic installations / V.V. Kuvshinov, E.G. Kakushina., S.A. Parakhnich, A.I. Bulanov // Power Plants and Technologies. 2018. T. 4. No. 1. P. 95-99.
5. Kuvshinov V.V. Use of photovoltaic plant to ensure the smooth operation of Autonomous consumers / E. Kakushina, D. Chvanova // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 1. pp. 62-67.
6. Kuvshinov V.V. Opportunities to improve the energy characteristics of solar plants in the production of thermal and electrical energy from one receiving surface / E. Kakushina // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 45-50.
7. Kuvshinov V.V. The use of thermo-photovoltaic plants to provide thermal and electrical energy of Sevastopol / E. Kakushina, A. Vasiliev. A. Goreckii // Journal of Sevastopol national University. - 2016. Vol. 2. No. 3. pp. 51-57.
8. Kuvshinov V.V. Investigation of seasonal operation of industrial photovoltaic module PS 250/ E. Kakushina, D. Smirnova // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 1. pp. 47-50.
9. Kuvshinov V.V. Transparent protective coating for a combined solar installations / E. Kakushina, A. Kocii // Journal of Sevastopol national University. - 2017. Vol. 3. No. 3. pp. 73-78.
10. Kuvshinov V.V. Comparison of theoretical and experimental results of the study of the characteristics of photovoltaic batteries with a change in the illumination of their working surface. / Kakushina E.G., Vasilchenko M.A., Kindler V.V., Kuvshinova V.V.// Power plants and technologies - 2019.V. 5. No. 1. P. 81-86.
11. 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.Yu.// Power plants and technologies - 2019.V. 5. No. 2. P. 104-110.
12. 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.
13. Kuvshinov V.V. Ensuring the non-volatility of the Crimean Peninsula using autonomous thermophotovoltaic stations. / Kakushina E.G., Khaibulaev E.L., Reshetnyak V.V.//In the collection: Ecological, industrial and energy safety - 2018 compilation articles on the materials of the international scientific-practical conference. under the editorship of L.I. Lukin, N.A. Bezhin, N.V. Lyamina. Sevastopol, 2018.S. 643-647.
14. Kuvshinov V.V. Storage System for Solar Plants. /Kolomiychenko V.P., Kakushkina E.G. (Erratum Kakushina E.G.), Abd Alia L.M., Kuvshinova V.V. Applied Solar Energy (English translation of Geliotekhnika) Publisher: Pleiades Publishing. 2019 Vol. 55 No 3. P. 153-158.

УДК 620.92

Комбинированная электроэнергетическая система на основе возобновляемой и водородной энергетики

О.Н. Титаренко[1], И.В. Симонов[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,г. Севастополь, 299053, Россия,.plotnykova198608@mail.ru[1] Ivan.Simonov.fez@yandex.ru[2]

Статья поступила 25.10.2019 г.; после доработки 31.10.2019.г.

Аннотация
В данной статье рассмотрена возможность использования комбинированной энергосистемы, включающей применение водородных энерготехнологий и возобновляемых источников энергии, как одного из основных направлений развития устойчивых экологически чистых энергетических систем.

Ключевые слова: Возобновляемая энергетика, водородная энергетика, комбинированные системы, экологическое топливо.

Combined electric power system based on renewable and hydrogen energy

O.N. Titarenko[1], I.V. Simonov[2]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st.,Sevastopol, 299053, Russia, plotnykova198608@mail.ru[1] Ivan.Simonov.fez@yandex.ru[2]

Received 25.10.2019 y.; received in final form 31.10.2019 y.

Abstract
This article considers the possibility of using a combined energy system, including the use of hydrogen energy technologies and renewable energy sources, as one of the main directions of the development of sustainable environmentally friendly energy systems.

Keywords: Leave Renewable energy, hydrogen energy, combined systems, ecological fuel.

Введение

За последние несколько лет возобновляемая энергетика, в частности ветровая и солнечная, из разряда нетрадиционных источников энергии плавно перешла в ряде Европейских стран в разряд традиционных источников энергии.

На сегодняшний день стоимость 1 кВт ч электроэнергии, полученной от береговой ветроустановки, равна стоимости электроэнергии, полученной при сжигании ископаемого топлива [2] (рис.1).

Однако, главные причины, сдерживающие повсеместное использование возобновляемых источников электроэнергии - это их непостоянство в выработке самой электроэнергии.

На сегодняшний день человечество не может эффективно запасать электроэнергию, но есть различные способы по преобразованию электроэнергии в другие формы и дальнейшему ее использованию.

На данный момент для накопления электроэнергии широко распространены аккумуляторные батареи (АКБ) и гидроаккумулирующие электростанции.

Недостатком таких установок является высокая стоимость, а в случае с АКБ еще и относительная недолговечность. Для аккумулирования

электроэнергии также можно применять теплоаккумуляторы в различных вариациях, однако преобразовывать электричество в тепло, а потом обратно не целесообразно. Такие установки в большинстве случаев используют только для отопления.

Одним из главных вопросов при решении данной проблемы есть способ получения водорода. Наиболее эффективный и экологичный метод - электролиз воды.

Одним из способов хранения электроэнергии есть использование водорода, произведенного с помощью электролиза, в качестве аккумулятора энергии. В качестве первичного источника электроэнергии может использоваться избыточная электроэнергия возобновляемых источников. Полученный водород становится вторичным энергоносителем, позволяющим не только длительное время хранить энергию, но и сглаживать неравномерность выработки из возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

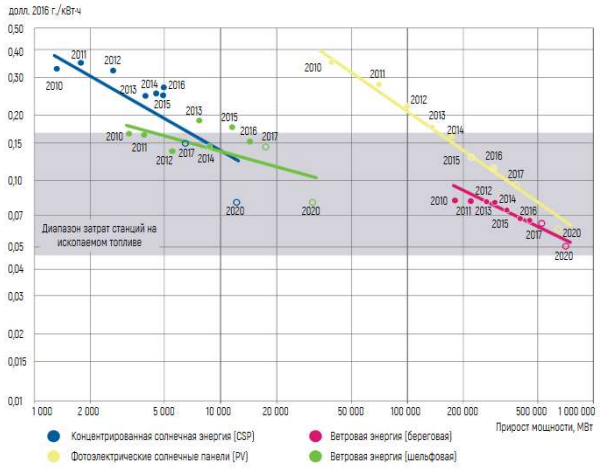


Рис.1. Диаграммы стоимости электроэнергии полученной от разных источников.

Постановка задачи

Задачей исследования проблемы является определение оптимального способа электрического разложения воды, улучшения процесса электролиза, а также составление схемы комбинированной установки с максимальным коэффициентом полезного действия (КПД).

Использование электролизера с твердым полимерным электролитом для получения водорода

Почему же именно водород? Водород является экологически чистым топливом, так как при его сгорании образуется вода, а также он обладает высокой энтальпией 143,06МДж/кг (у керосина 46МДж/кг), высокой теплопроводностью, низкой вязкостью, имеет большой срок хранения и обширные отрасли применения [4]. С учетом того, что электроэнергия для электролиза получается из возобновляемых электроустановок, а именно таких как ветровая (ВЭС) или солнечная электростанция (СЭС), получаемое топливо является полностью экологически чистым.

Принцип работы электролизера основан на электрохимическом разложении воды на водород и кислород в электролизере с твердым полимерным электролитом (ТПЭ) рис.2.

Преимуществом таких установок является высокий КПД при электролизе, они более компактны по сравнению с другими видами электролизеров, а также в таких установках отсутствуют циркулирующие агенты (кислоты или щелочи), вызывающие коррозию технологического оборудования [1].

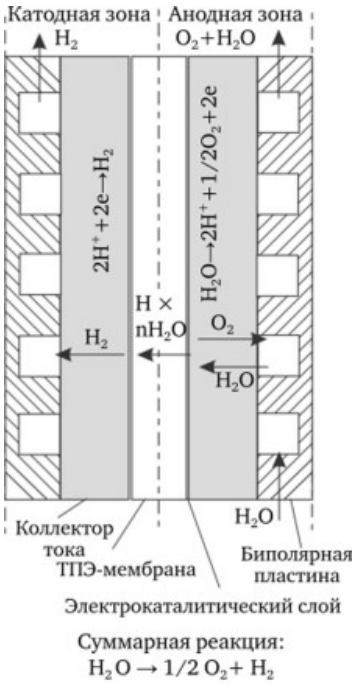


Рис.2. Электролизеры с твердополимерным электролитом.

Из недостатков таких электролизеров выделяют высокую стоимость и необходимость использования обессоленной воды, однако это позволяет увеличить эксплуатационный период до 20 лет [8].

Поскольку вода для электролиза подается дистиллированная необходимо повысить ее электропроводность, для этого используют электрокатализатор содержащий драгметаллы.

Применение драгметаллов увеличивает стоимость электролизера, однако около 70% стоимости получаемого водорода - это затраты на электроэнергию [5]. Электролизеры на ТПЭ экономят 20-30% электроэнергии. В таблице 1 показаны основные характеристики основных трех типов электролизеров [7]:

- с щелочным электролитом;
- с твердым полимерным электролитом (ТПЭ);
- с твердым оксидным электролитом (ТОЭ).

Таблица 1. *Характеристики электролизеров*

Тип электролита	**Энергозатраты,** H_2 $\frac{м^3}{кВт*ч}$	**Температура, К**	**Давление, МПа**	**КПД, %**
Щелочной	4,5-5,5	320-370	0,1-5	50-70
ТПЭ	3,5-4,5	350-370	0,1-15	80-90
ТОЭ	2,5-4	1070-1270	0,1-3	80-85

У электролизеров с твердополимерным электролитом есть два режима эксплуатации. Первый - это непосредственно разложение воды на газы. Второй - получение постоянного напряжения при подаче водорода на анод, а кислорода на катод, в результате чего происходят следующие реакции:

- на аноде $2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$
- на катоде $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$

В электролизере используются ионообменные мембраны, которые являются «твердыми» телами, набухая в воде, мембрана фактически представляет собой «твердый» электролит, к которому применимы многие закономерности, свойственные жидким электролитам. Такой электролит обладает рядом важных свойств:

- высокой электропроводностью при достаточной прочности;
- хорошей химической стойкостью в окислительных и восстановительных реакциях;
- низкой газопроницаемостью.

Генерация водорода осуществляется с использованием электролизера фильтр-прессного типа с твердополимерным электролитом.

Основные преимущества перед щелочными и твердооксидными электролизерами следующие: электролитическая ячейка работает при высоких давлениях, концентрация электролита неизменна, если электролит находится в стационарном состоянии, отсутствуют циркулирующие кислоты или щелочи (необходимые для электролиза), происходит снижение расхода электроэнергии на получение газа, а также что не мало важно генерируемые газы имеют высокую чистоту (H_2 - до 99,99 %, O2 - до 99,95 %).

Рассмотрим преимущества электролиза под давлением. Процесс повышения давления при электролизе заключается в том, что при разложении 1 литра воды (молярная масса 18г/моль) получаем 83,3 моля газов. $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$. В нормальных условиях 1 моль газа занимает объем 22,4 литра, следовательно, 83,3 моля водорода и кислорода занимали бы 1865,9литров, при неизменном объеме происходит увеличение давления. При исследовании электролиза воды под давлением был обнаружено, что напряжение на ячейке, работающей под давлением 50 атм снижалось.

Это объясняется тем, что под давлением объем, занимаемый выделяющимися газами, становиться меньше, следовательно, снижается газонаполнение электролита, а также диафрагмы и их сопротивление уменьшается. Уменьшение сопротивления компенсирует рост напряжения разложения воды с повышенным давлением. Процесс электролиза под давление так же упрощает производственную схему, позволяя сразу же закачивать водород и кислород в баллоны с определенным давлением.

Отсутствие компрессорной установки так же повышает эффективность электролизера. В итоге получим напряжение на ячейке U=1,4В с плотностью тока до $2\ ^{А}/_{см^2}$.

Особенностью предлагаемого генератора водорода является совмещение двух режимов работы:

- режим стабилизации давления водорода на входе потребителя (для работы с лабораторными и промышленными потребителями, имеющими в своем составе средства поддержания заданного расхода газа);
- режим стабилизации расхода водорода на входе потребителя (для газоаналитических приборов, не имеющих в своем составе средств поддержания заданного расхода водорода);

Применение солнечных вакуумных коллекторов

Давление позволяет производить электролиз при более высокой температуре, что в свою очередь повышает общую эффективность так как разложение воды осуществляется под действием не только электроэнергии, но и тепла.

Для оптимальной работы температура электролита должна быть 350-370 К. При электролизе происходит нагрев электродов, что увеличивает температуру электролита. Но можно повышать температуру электролита предварительно нагрев воду в солнечном коллекторе.

Использование вакуумного коллектора (рис.3) наиболее оправдано, так как он эффективно и равномерно нагревает воду целый год (график 1).

Такие коллекторы обладают большей стойкостью к внешним загрязнениям (снег, листья, пыль) и простотой установки (подсоединение осуществляется без прямого контакта с рабочей жидкостью).

В случае неисправности какой-либо из трубок вакуумного коллектора ее легко заменить, не выводя из строя всю систему. У такого коллектора незначительные потери тепла, поскольку есть вакуумная прослойка, которая находиться между внешней и внутренней стеклянной трубкой.

На рис.3 показано строение вакуумной трубки, где вакуумная прослойка даёт возможность сохранить около 93 % улавливаемой тепловой энергии. Рабочая жидкость испаряется при 30 ℃ и принимает тепло вакуумной трубки, впоследствии отдавая тепло чистой обессоленной воде, используемой в электролизере. Благодаря этому, при температуре окружающей среды -7℃ , вода во втором контуре нагревается до +30℃. В теплое время года максимальная температура нагрева воды достигает 300℃. На рис.4. показана зависимость тепловой производительности по месяцам года для плоского и вакуумного коллекторов.

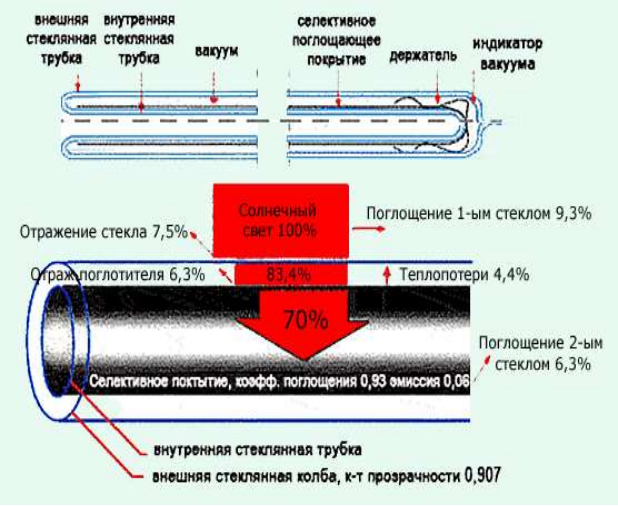


Рис.3. Строение вакуумной трубки вакуумного коллектора.

Рис. 4. Зависимость тепловой производительности по месяцам года для плоского и вакуумного коллекторов.

Комбинированная энергетическая система

Схема комбинированной системы на основе возобновляемой и водородной энергии представлена на рис.5. Электроэнергия с солнечных панелей или ветроустановок поступает в управляющий блок, который подает на нагрузку необходимое количество электричества, а оставшуюся часть на электролизер. Произведенные газы закачиваются в раздельные ресиверы. Дальнейшее сжижение водорода не эффективно, так как требует больших затрат, а также чистый водород может храниться достаточно долго. Далее, в темное время суток или в безветренную погоду водород и кислород поступают из ресиверов в водородный генератор для сжигания и получение электроэнергии.

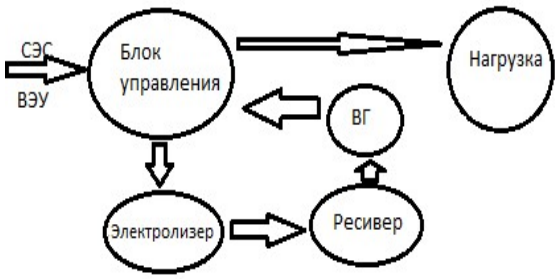


Рис.5. Схема комбинированной системы электроснабжения.

Хранение водорода

Хранение газообразного водорода на сегодняшний день не представляет особых трудностей. Водород, помещенный в баллон, может быть использован как топливо для топливного элемента с дальнейшим использованием в различных сферах. Запасаться в небольшом количестве водород может в специальных баллонах, предназначенных для него, так как такой баллон

имеет достаточные прочностные характеристики.

Новые разработки в области материаловедения открыли новое поколение газовых баллонов, состоящих из тонкой пластиковой оболочки покрытой снаружи композитным пластиком, углеродным волокном [6]. Подобные баллоны способны хранить водород под давлением до35-69 МПа [9]. Высокое давление позволяет уменьшить площади, занимаемые водородом при его хранении, а также при транспортировке. Опыты показывают, что водород может длительное время храниться без значительных потерь.

Заключение

Энергетика является важнейшей движущей силой мирового экономического прогресса. Устойчивая энерго-экономика есть одним из условий международной, экономической, экологической и социальной стабильности, как в глобальном масштабе, так и в отдельных государствах и регионов.

В этой связи Россия выступает за объединение усилий для солидарного комплексного решения перспективных энергетических проблем и задач. Одной из таких задач и является комплексное использование возобновляемой и водородной энергетики.

Эффективнее использовать подобную энергетическую систему в районах с частыми перебоями электроснабжения. Несмотря на относительно высокую стоимость, переход на водород значительно снизит загрязнение окружающей среды и глобальное потепление.

Водород составляет практически 90% вселенной, научиться эффективно его получать и запасать является важной задачей.

Энергетическая стратегия России до 2035 года предполагает ввод в эксплуатацию новых мощностей на основе возобновляемых источников энергии, а также развитие научно-технической базы.

Использование комбинированной электроэнергетической системы на основе возобновляемой и водородной энергетики даст импульс к развитию ВИЭ и откроет перспективы к дальнейшему развитию водородной энергетики.

Например, концепция Smart-Grid в будущем предполагает объединение трех систем: электрической, топливной и тепловой [10].

По мнению международного энергетического агентства, водород может стать связующим звеном между этими системами (рис 6).

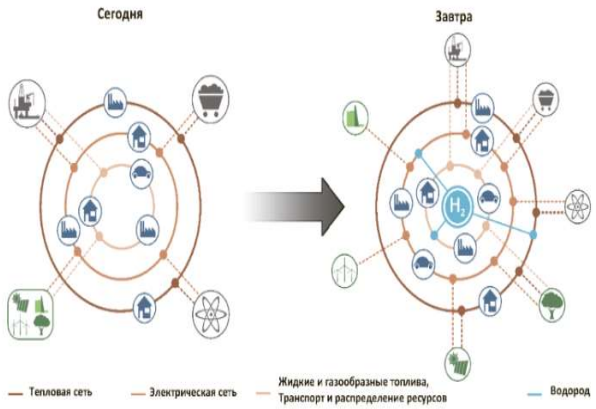


Рис.6. Место водорода как нового энергоносителя в интегрированном энергетическом комплексе.

Список литературы

1. Электролиз воды — Якименко Л.М. 1970г, 186 с.
2. Прогноз развития энергетики мира и России. Москва 2019 г, 25-27 с. https://energy.skolkovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf
3. Водородные энергетические технологии. Материалы семинара лаборатории ВЭТ ОИВТ РАН. 2019г .
4. Льюис Б., Эльбе Г.Горение, пламя и взрывы в газах. 2-е изд. Пер. с англ. под ред. К. И. Щёлкина и А. А. Борисова.—М.:Мир, 1968.
5. Патент Стенли Мейера US 4 936 961 A
6. Метод производства топливного газа. Комбинированные энергетические технологии, сочитающие возобновляемую и водородную энергетику.https://elibrary.ru/item.asp?id=28851670
7. Получение водорода методом электролиза.https://studme.org/152621/tehnika/polucheni e_vodoroda_metodom_elektroliza
8. Электролизеры с твердополимерным электролитом. https://msd.com.ua/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/elektrolizery-s- tverdopolimernym-elektrolitom/
9. Хранение газообразного водрода. https://studme.org/152658/tehnika/hranenie_gazoobraznogo_vodoroda
10. Проект энергостратегии российской федерации на период до 2035 года, 38-40 с. https://minenergo.gov.ru/node/1920

References

1. Electrolysis of water - Yakimenko L. M
2. Forecast of the development of energy in the world and Russia 25-27 p. https://energy.skol-

kovo.ru/downloads/documents/SEneC/Research/SKOLKOVO_EneC_Forecast_2019_Rus.pdf
3. Hydrogen energy technologies. Materials of the seminar of the laboratory VET OIVT RAS. 2019
4. Lewis B., Elbe G. Combustion, flame and gas explosions. 2nd ed. Per. from English under the editorship of K.I.Shchelkina and A.A.Boris-owl. - M.: Mir, 1968
5. Stanley Meyer Patent US 4,936,961 A Fuel Gas Production Method.
6. combined energy technologies combining renewable and hydrogen energy. Https: //elibrary.ru/item.asp Id = 28851670
7. Hydrogen production by electrolysis.https: //studme.org/152621/tehnika/polu-chenie_vodoroda_metodom_elektroliza
8. Electrolyzers with solid polymer electrolyte. https://msd.com.ua/vozobnovlyaemye-istochniki-energii/elektrolizery-s-tverdopolimernym-elektrolitom/
9. Storage of gaseous hydrogen. https://studme.org/152658/tehnika/hranenie_gazoobraznogo_vodoroda
10. The draft energy strategy of the Russian Federation for the period until 2035, 38-40 p. https://minenergo.gov.ru/node/1920

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК. 621.311:658

Влияние условий внешней среды на результаты инфракрасной диагностики

А.Р. Богдан[1], В.В. Смирнов[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]alexey.bogdan98@gmail.com, [2]svadick@mail.ru

Статья поступила 14.11.2019 г.; после доработки 18.11.2019 г.

Аннотация
Результаты диагностики электрооборудования с использованием тепловизора могут быть искажены из-за влияния внешних факторов и строения самого объекта исследования. Рассматриваются особенности учёта влияющих факторов на получаемый результат.

Ключевые слова: инфракрасный контроль, излучательная способность, тепловая инерция.

Influence of environmental conditions on the results of infrared Diagnostics

A.R. Bogdan [1], V.V. Smirnov [2]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]alexey.bogdan98@gmail.com, [2]svadick@mail.ru

Received 14.11.2019 y.; received in final form 18.11.2019 y.

Abstract
Diagnostic results of electrical equipment using a thermal imager may be distorted due to the influence of external factors and the structure of the object of study. The features of accounting for influencing factors on the result are considered.

Key words: infrared control, emissivity, thermal inertia.

Введение

Поддержание необходимой степени надежности оборудования в процессе его эксплуатации обеспечивается системой технического обслуживания и ремонта.

Решение задач по оценке технического состояния электрооборудования в значительной степени связано с внедрением эффективных методов инструментального контроля и технической диагностики. В частности, основанных на дистанционном анализе поверхностных температурных полей объектов по их собственному тепловому излучению.

Применяемые в настоящее время классические методы диагностики оборудования позволяют определить состояние изоляции токоведущих частей электрооборудования в том числе:

- сопротивление изоляции и коэффициент абсорбции;
- определить тангенс угла диэлектрических потерь изоляции обмоток;
- определить состояние токоведущих частей и контактных соединений электрооборудования, применяя мостовой метод измерения;
- определить состояние магнитной системы

электрооборудования способом измерения тока холостого хода и снятие характеристик намагничивания;
- испытание изоляции повышенным напряжением переменного тока и выпрямленным;
- испытания трансформаторного масла.

Все эти виды диагностики имеют один большой недостаток, измерение проводят на остановленном, отключенном от сети оборудовании. В этой ситуации важнейшее значение имеют методы диагностики, которые позволяют контролировать состояние оборудования в процессе эксплуатации. В этом отношении применение средств инфракрасной (ИК) техники для оценки теплового состояния обеспечивает получение оперативной информации на работающем оборудовании.

К таким современным и высокоэффективным способам диагностики относится тепловизионное обследование.

Постановка цели и задач научного исследования

Целью данной работы является изучение влияния условий внешней среды на результаты, полученные при инфракрасной диагностике. Задачей работы является описание и систематизация влияния различных факторов окружающей среды на измерительную способность инфракрасного измерительного устройства.

Погрешность при инфракрасном контроле

Инфракрасный (ИК) контроль желательно проводить при отсутствии солнца (в облачную погоду или ночью), предпочтительно перед восходом солнца, при минимальном воздействии ветра в период максимальных токовых нагрузок, лучше весной - для уточнения объема ремонтных работ и (или) осенью - в целях оценки состояния электрооборудования перед зимним максимумом нагрузки. При проведении ИК-контроля должны учитываться следующие факторы:
- коэффициент излучения материала;
- солнечная радиация;
- скорость ветра;
- расстояние до объекта;
- значение токовой нагрузки;
- тепловое отражение и т.п.

При проведении инфракрасного обследования электрооборудования существенное значение имеет выявление и устранение систематических и случайных погрешностей, оказывающих влияние на результаты измерения.

Систематические погрешности заключены в конструкции измерительного прибора, а также зависят от его выбора в соответствии с требованиями к совершенству измерения (разрешающей способности, поля зрения и т.п.).

Случайными погрешностями, возникающими при проведении ИК-контроля, могут являться: воздействие солнечной радиации, выбор излучательной способности и др.

Влияние излучательной способности

Коэффициент излучения материала в общем виде зависит от длины волны, угла наблюдения поверхности контролируемого объекта и температуры.

Для металлов коэффициенты излучения постоянны в интервале углов наблюдения (0-40) градусов, для диэлектриков - в интервале углов (0-60) градусов.

За пределами этих значений коэффициент излучения быстро уменьшается до нуля при направлении наблюдения по касательной.

Так, при длине волны излучения 10 мкм при наблюдении по нормали вода близка к абсолютно черному телу, а при наблюдении по касательной становится зеркалом E = 0. Для металлов в отличие от газообразных и жидких веществ спектральный коэффициент излучения изменяется весьма слабо (табл.1).

Таблица 1. *Коэффициенты излучения материалов*

Вид материала	Состояние поверхности	Температура, °С	Коэффициент излучения, мкм
1	2	3	4
алюминий	анодированный	100	0,55
	необработанная поверхность	20-50	0,06-0,07
	окисленный	50-500	0,2-0,3
	полированный	50-100	0,04-0,06
бронза	необработанная	50-100	0,55
	полированная	50	0,1
железо	ржавое	20	0,61-0,85
	необработанное	20	0,24
	окисленное	100	0,74
	оцинкованное	30	0,25
	полированное	400-1000	0,14-0,38
латунь	окисленная	200-600	0,6
	полированная	100	0,03

1	2	3	4
медь	полированная	20-100	0,02-0,05
	с тонкой окисной пленкой	20	0,037
	оксидированная	100-200	0,6-0,73
	электролитическая,	20-100	0,05
свинец	блестящий	250	0,08
	серый, окисленный	20	0,28
сталь	заржавленная	20	0,69
	легированная	500	0,35
	нержавеющая	20-700	0,16-0,45
	оксидированная	200-600	0,8
	оцинкованная	20	0,28
	полированная	100	0,07
асбест	плиты шероховатые, серые	-	0,96
	бумага	-	0,94
	картон	20-700	0,74-0,88
бетон	плиты гладкие	-	0,63
	стены литые, необработанные	-	0,55
битум	кровельный, плоский	-	0,96
	жидкий	-	1,0
краски масляные	матовая черная	100	0,98
	разных цветов	100	0,92-0,94
стекло	-	20-100	0,91-0,94
графит	обработанный напильником	20	0,98

В электроустановках различие в углах наблюдения может возникнуть при проведении ИК-контроля под углом к токоведущей шине (рис.1).

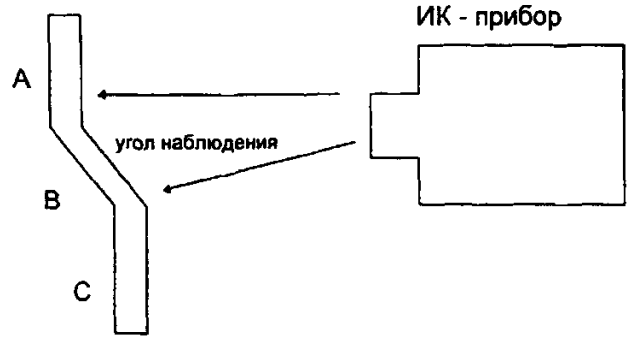


Рис. 1. Влияние излучательной способности

На участках А и С наблюдение осуществляется по нормали к плоскости шины, на участке В будет превалировать отражательная способность материала, что будет искажать картину теплового изображения.

Коэффициенты излучения металлов с ростом температуры обычно увеличиваются (см. табл.1).

Обычно коэффициент излучения зависит от состояния поверхности металла. Поскольку токоведущий узел электрического аппарата или установки может включать в себя несколько компонентов из разнородных металлов, поверхности которых окрашены, имеют окисные пленки или разную степень обработки поверхности, т.е. различные коэффициенты излучения, при инфракрасном контроле могут возникнуть предположения о перегревах на участках с повышенными коэффициентами излучения.

В подобных случаях целесообразно провести пофазное сравнение результатов измерения, оценить состояние поверхности перегретого участка (точки) с помощью бинокля, выяснить объем ремонтных работ, проводившихся на данном токоведущем узле, и т.п. В том случае, если коэффициент излучения контролируемого объекта известен, его фактическая температура может быть определена по формуле согласно [1]:

$$T_{факт} = \frac{T_{рад}}{\sqrt[4]{E}},$$

где $T_{рад}$ - радиационная температура, измеренная ИК-прибором;

E - коэффициент излучения контролируемой поверхности.

В практике может возникнуть необходимость в определении коэффициента излучения контролируемого объекта или его узла.

Для этого на участок контролируемой поверхности следует нанести покрытие из матовой черной краски или наклеить кусок ленты для фотошаблонов, коэффициенты излучения которых близки к единице.

После того как покрытие или лента приобретает температуру объекта, осуществляется измерение $T_{факт}$.

Измерив температуру $T_{рад}$ неокрашенного участка, по приведенной выше формуле можно определить его коэффициент излучения согласно [1].

Влияние внешних условий

1. Солнечное излучение (ИК)

Солнечная радиация нагревает контролируемый объект, а также при наличии участков (уз-

лов) с хорошей отражательной способностью создает впечатление о наличии высоких температур в местах измерения.

Эти явления особенно проявляются при использовании ИК-приборов со спектральным диапазоном 2-5 мкм.

Для исключения влияния солнечной радиации рекомендуется осуществлять ИК-контроль в ночное время суток (предпочтительно после полуночи) или в облачную погоду. При острой необходимости измерение в электроустановках при солнечной погоде рекомендуется производить для каждого объекта поочередно из нескольких диаметрально противоположных точек.

2. Ветер

Если ИК-контроль осуществляется на открытом воздухе, необходимо принимать во внимание возможность охлаждения ветром контролируемого объекта (контактного соединения). Так, превышение температуры, измеренное при скорости ветра 5 м/с, будет примерно в два раза ниже, нежели измеренное при скорости ветра 1 м/с. В диапазоне скоростей 1-7 м/с справедлива формула [2]:

$$\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = \left|\frac{V_1}{V_2}\right|^{0,448}$$

где ΔT1 - превышение температуры при скорости ветра V1;

ΔT2 - то же при скорости ветра V2.

Измерения при скорости ветра выше 8 м/с рекомендуется не проводить.

3. Нагрузка

Температура токоведущего узла (контактного соединения) зависит от нагрузки и прямо пропорциональна квадрату тока, проходящего через контролируемый участок [4]:

$$\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} = \left|\frac{I_1}{I_2}\right|^2$$

где ΔT1 - превышение температуры при токе I1;

ΔT2 - то же при токе I2.

При необходимости пересчет желательно проводить от более высокой нагрузки к более низкой и при близких значениях токов (отличия на 20-30%).

4. Тепловое отражение

В ряде случаев, особенно при ИК-контроле токоведущих частей, расположенных в небольших замкнутых объемах (например, в КРУ или КРУН), приходится сталкиваться с возможностью получения ошибочных результатов из-за теплового отражения от нагревательных элементов, ламп освещения, соседних фаз и др. (рис.4).

Последнее проявляется при контроле токоведущей части с малым коэффициентом излучения, обладающей хорошей отражательной способностью.

В результате термографическая съемка может показать горячую точку (пятно), хотя в действительности это просто тепловое отражение.

Поэтому рекомендуется в подобных случаях производить ИК-обследование объекта под различными углами зрения и изменением местоположения оператора с ИК-прибором. При необходимости на время измерения отключается освещение объекта и т.п.

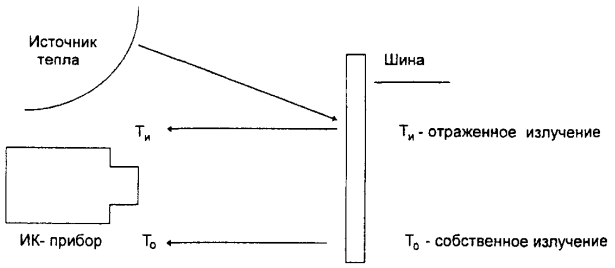


Рис. 2. Влияние теплового отражения

5. Тепловая инерция

При переменной токовой нагрузке приходится считаться с тепловой инерцией контролируемого объекта. Так, тепловая постоянная времени для контактных узлов аппаратов составляет порядка 20-30 мин, поэтому при определении тока нагрузки по амперметру контролируемого присоединения не следует учитывать кратковременные "броски" тока, связанные с коммутационными процессами или режимом работы потребителя. Тепловая постоянная для вентильных разрядников составляет порядка 6-8 ч, поэтому результаты измерения тепловизором только что поставленного под напряжение разрядника могут оказаться ошибочными.

6. Дождь и снег

Дождь, туман, мокрый снег в значительной степени охлаждают поверхность объекта, измеряемого с помощью ИК-прибора, и в определенной мере рассеивают инфракрасное излучение каплями воды; ИК-контроль допускается проводить при небольшом снегопаде с сухим снегом или легком моросящем дождике.[4].

Периодичность должна выбираться исходя из времени развития дефекта, периодичность проведения диагностики должна быть меньше этого времени. А время развития дефекта боль-

шинства видов оборудования, не превышает одного года, поэтому и диагностика должна проводится не реже одного раза в год. Однако оказалось более эффективным проведение диагностики дважды в год: весной после прохождения осенне-зимнего максимума нагрузок и изменения режима работы оборудования, когда наиболее явно выявляются дефекты и есть возможность их устранения во время ремонтной кампании, и осенью перед осенне-зимним максимумом нагрузок. Проведение диагностики дважды в год особенно необходимо на объектах, оборудование которых работает при интенсивных нагрузках и срок эксплуатации составляет 15–20 лет и более [1]. На таких объектах выявлялись интенсивно развитые дефекты при диагностике через 5–6 месяцев [3].

Вывод

Произведенный анализ влияния различных внешних условий на измерительное устройство инфракрасной диагностики показал, что искажение температур поверхностей -это абсолютно нормальное явление, однако игнорировать этот факт не целесообразно из-за погрешности измерений и затруднений при оценке данных. Быстрота выявления температурных изменений электроустановок позволяет на ранних стадиях выявлять дефекты и иметь полную и достоверную информацию о состоянии отдельных частей электрооборудования.

Список литературы

1. Flirsystems. Руководство пользователя ThermaCAME300. Pub.№1558423-февраль,2007.
2. Сидельников Л.Г. «Проблемы диагностики силового электрооборудования». ООО «ТестСервис», г. Пермь
3. Ю.В. Поляков В.С. Опыт тепловизионной диагностики высоковольтного оборудования атомных электростанций Сборник материалов семинара «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования». Выпуск 4: «Методы и средства оценки состояния энергетического оборудования, зданий и сооружений на основе приёма излучения в инфракрасном диапазоне» – Петербургский энергетический институт повышения квалификации, Санкт-Петербург, 1997.
4. РД 153-34.0-20.363-99. «Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ»-РАО «ЕЭС Росиии»,М: ОРГРЭС, 2000.

References

1. Flirsystems. ThermaCAME300 User Guide. Pub.No.1558423-February, 2007.
2. Sidelnikov L.G. "Problems of diagnostics of power electrical equipment." TestService LLC, Perm
3. Yu.V. Polyakov V.S. Experience in thermal imaging diagnostics of high-voltage equipment of nuclear power plants. A collection of materials from the seminar "Methods and tools for assessing the state of power equipment." Issue 4: “Methods and tools for assessing the state of energy equipment, buildings and structures based on the reception of radiation in the infrared range” - St. Petersburg Energy Institute of Advanced Studies, St. Petersburg, 1997.
4. RD 153-34.0-20.363-99. "The main provisions of the methodology for infrared diagnostics of electrical equipment and overhead lines" -RAO "UES of Rosiii", M: OR-GRES, 2000.

УДК.629.313.323

Схемотехническое решение системы непрерывного тестового контроля статических реле направления мощности РСМ-13 и реле максимального тока РСТ-13

В.М. Завьялов, А.В. Углов, М.Б. Углова, Е.А. Дубков
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия, anatolyuglov@yandex.ru

Статья поступила 24.10.2019 г.; после доработки 25.10.2019 г.

Аннотация

В настоящее время в устройствах релейной защиты и автоматизации электрооборудования электрических станций широко применяются статические реле. По опыту эксплуатации неоднократно имели место случаи отказа срабатывания или несрабатывания данных реле. На основе анализа сигналов в контрольных точках предложено схемотехническое решение устройства непрерывного тестового контроля статических реле направления мощности РСМ-13 и максимального тока РСТ-13.

Ключевые слова: Статическое реле, реле направления мощности, реле максимального тока.

Circuitry solution of the continuous test control system of static power direction switches PCM-13 and overcurrent relay PCT-13

V.M. Zavyalov, A.V. Uglov, M.B. Uglova, E.A. Dubkov
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, anatolyuglov@yandex.ru

Received 24.10.2019 y.; received in final form 25.10.2019 y.

Abstract

Currently static relays are widely used in relay protection devices and automation of electrical equipment of power plants. According to the operating experience, there have repeatedly been cases of failure of the operation or failure of the relay data. Based on an analysis of the signals at the control points, a circuit design solution for the continuous test control of static power direction switches PCM-13 and maximum current PCT-13 is proposed.

Keywords: static relay, power direction relay, overcurrent rela*y.*

Введение

Высокие требования к правильной работе элементов собственных нужд напряжением 6,3 и 0,4 кВ электрических станций в условиях ударных и вибрационных нагрузок (землетрясения, падения самолёта и др.) обусловили разработку и выпуск промышленностью специальной серии сейсмостойких реле[1].

Эти реле не изменяют положения своих выходных контактов, обусловленного требованиями к срабатыванию или несрабатыванию реле, при вибрационных нагрузках с максимальным ускорением 3·g в диапазоне частот от 5 до 15 Гц и 1·g в диапазоне от 16 до 100 Гц, а также при многократных ударах с длительностью удара от 2 до 20 мс и ускорением до 3·g.

Кроме того, сейсмостойкие реле обладают рядом улучшенных по сравнению с обыкновен-

ными электромеханическими реле характеристиками.

В связи с вышеизложенным, устройства релейной защиты всех элементов сети собственных нужд напряжением 6,3 кВ атомных электрических станций выполняются только на сейсмостойких реле.

Постановка цели научной работы

Задачей исследования является разработка схемотехнического решения устройства непрерывного тестового контроля статических реле без изменения их принципиальной электрической схемы на примере реле направления мощности РСМ-13 и реле максимального тока РСТ-13.

Особенности исполнения полупроводниковых реле мощности серии РСМ-13

Структурная схема реле представлена на рис. 1 [2].

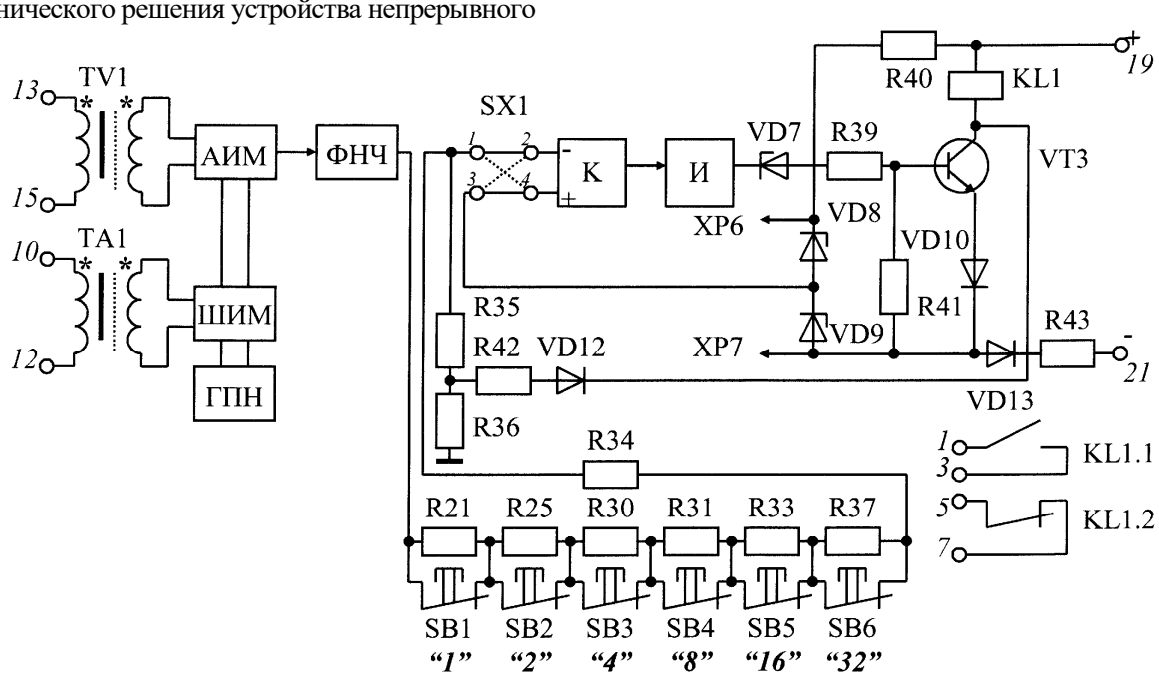


Рис. 1. Структурная схема реле направления мощности типа РСМ-13.

С помощью трансформатора тока ТА1 входной ток преобразуется в пропорциональное напряжение, которое в широтно-импульсном модуляторе сравнивается по величине с напряжением с выхода генератора пилообразных импульсов ГПН. Если разность напряжений Uвых ГПН и Uвых ТА1 меньше нуля, то на выходе ШИМ присутствует максимальное отрицательное напряжение (-15 В). Если разность этих напряжений больше нуля, то на выходе ШИМ присутствует максимальное положительное напряжение (+15 В). Так как частота Uвых ГПН значительно превышает частоту Uвых ТА1, то на выходе ШИМ образуются прямоугольные импульсы амплитудой ±15 В. При этом длительность импульсов, совпадающих по знаку с Uвых ТА1, пропорциональна мгновенному значению входного тока реле. Импульсы с выхода ШИМ поступают на вход амплитудно-импульсного модулятора АИМ, на второй вход которого поступает напряжение с выхода трансформатора напряжения TV1 Uвых TV1, пропорциональное напряжению на входе реле. На выходе АИМ формируется импульсное напряжение, причём амплитуда всех импульсов пропорциональна мгновенному значению входного напряжения реле. При этом длительность импульсов положительной полярности на выходе АИМ прямо пропорциональна мгновенному значению тока на входе реле в течение времени, когда полярности входных значений тока и напряжения совпадают, и обратно пропорциональна мгновенному значению тока на входе реле в течение времени, когда полярности входных значений тока и напряжения находятся в противофазе.

На рис. 2 и 3 приведены временные диаграммы напряжений в контрольных точках на выходе отдельных элементов реле.

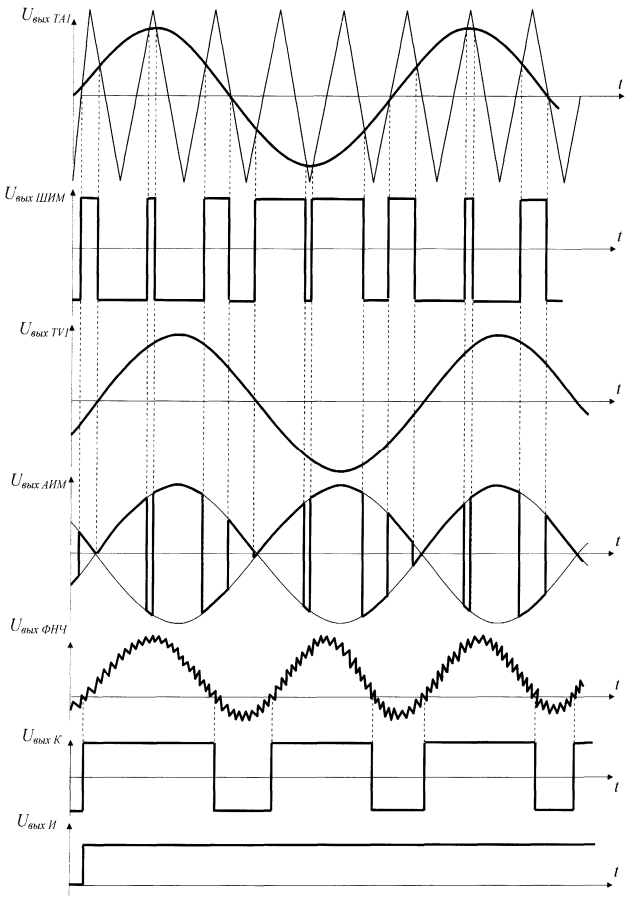


Рис. 2. Временная диаграмма работы реле РСМ-13 при мощности, соответствующей уставке по срабатыванию.

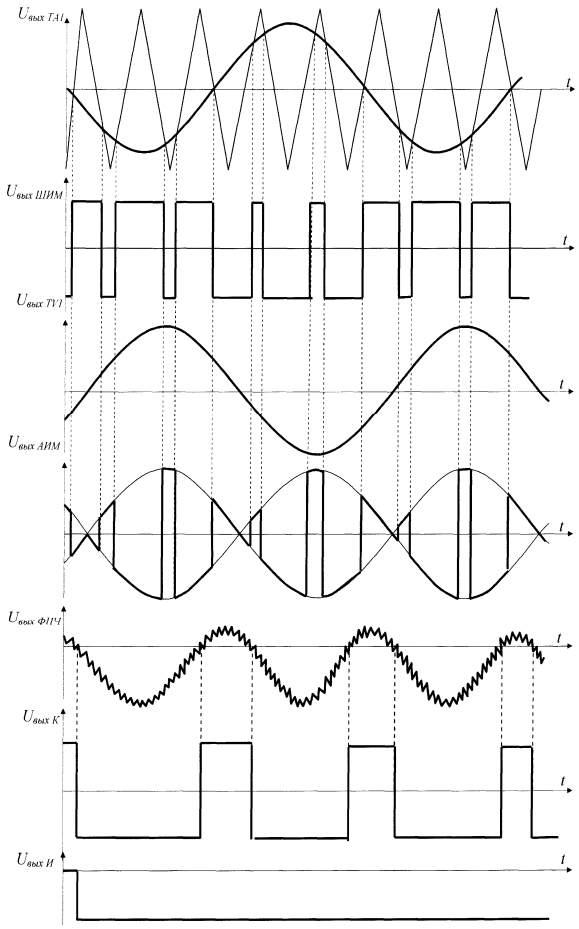


Рис. 3. Временная диаграмма работы реле РСМ-13 при мощности ниже уставки по срабатыванию.

Следовательно, постоянная составляющая выходного напряжения АИМ пропорциональна величине и знаку (направлению) мощности на входе реле, и наибольшая положительная величина этой постоянной составляющей при заданных величинах тока и напряжения будет, когда ток и напряжение совпадают по фазе, т.е. по принципу действия угол максимальной чувствительности реле φм.ч.=00.

Для выделения постоянной составляющей из выходного напряжения АИМ сигнал с выхода АИМ проходит через активный фильтр низких частот ФНЧ, резисторную цепь для регулирования уставок по величине мощности и сравнивается по величине с напряжением на делителе R35, R36 при помощи компаратора К.

Так как неинвертирующий вход компаратора К имеет нулевой потенциал, то в те моменты, когда мгновенное положительное значение напряжения на выходе резисторной цепи больше напряжения на делителе R35, R36, напряжение на выходе компаратора

К максимальное положительное (+15 В). В остальные моменты времени напряжение на выходе компаратора К максимальное отрицательное (-15 В).

Двухполярные импульсы с выхода компаратора К проходят через интегратор И и, если напряжение на выходе интегратора И положительное, а его величина превышает порог стабилитрона VD7, то через резистор R39 открывает транзистор VT3.

При этом срабатывает выходное реле KL1, а также с помощью цепи: диод VD12 - резистор R42 уменьшается напряжение на делителе R35, R36, что обеспечивает необходимый коэффициент возврата и тем самым устойчивую работу реле РСМ13 при срабатывании. Диод VD10 и резистор R41 служат для обеспечения режима отсечки транзистора VT3 в закрытом состоянии, а диод VD13 для защиты схемы от ошибки в полярности при подключении реле к питающему напряжению. Стабилитроны VD8 и VD9 и резисторы R40 и R43 предназначены для получения двухполярного напряжения ±15 В, необходимого для питания генератора ГПН, модуляторов

ШИМ и АИМ, активного фильтра ФНЧ, компаратора К и интегратора И.

Особенности исполнения полупроводниковых реле максимального тока серии РСТ-13

Сейсмостойкие реле тока типа РСТ-13 предназначены для использования в схемах релейной защиты токовых отсечек электродвигателей напряжением 6 кВ и трансформаторов собственных нужд 6,3/0,4 (6,3/0,23) кВ, резервных защит сети собственных нужд напряжением 6,3 кВ, максимальных токовых защит линий, питающих секции надёжного питания и т.д.

Структурная и принципиальная электрическая схемы реле представлены на рис. 4 и 5. На рис. 6 приведены временные диаграммы, поясняющие работу реле [3].

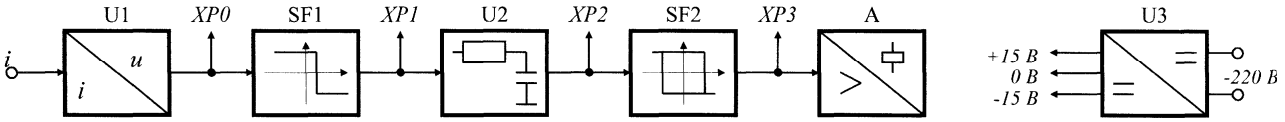


Рис. 4. Структурная схема реле типа РСТ13.

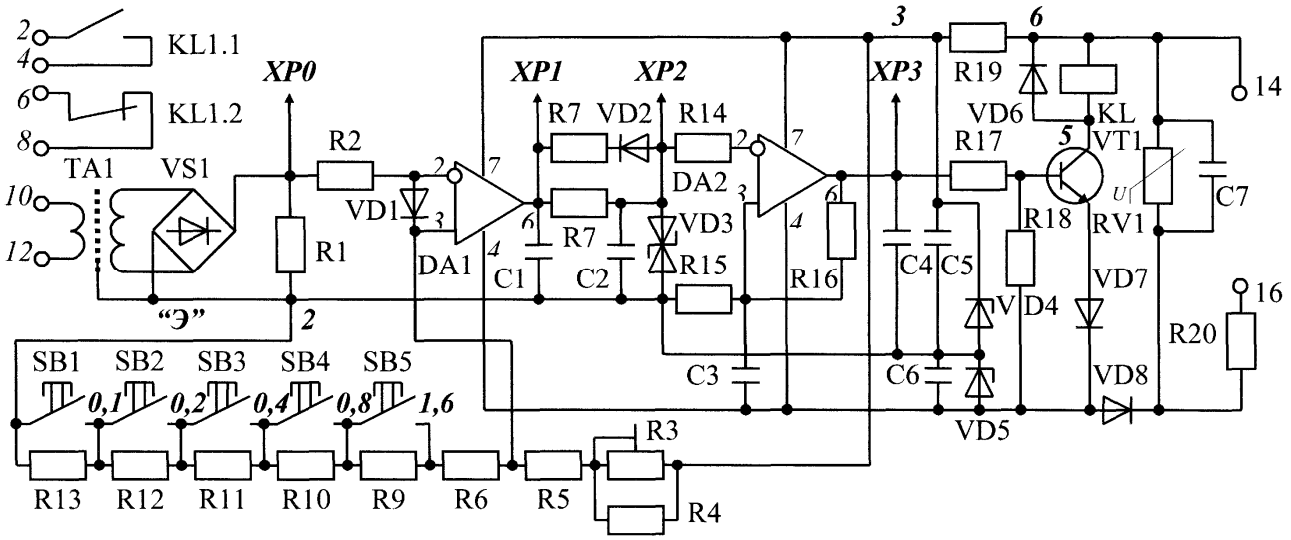


Рис.5. Принципиальная электрическая схема реле типа РСТ-13.

Порог переключения компаратора SF1 определяется напряжением, подаваемым на неинвертирующий вход операционного усилителя DA1 с делителя R3...R13. Коэффициент передачи делителя можно изменять манипулируя переключателями SV1...SV5.

Диапазон уставок реле определяется характеристиками входного преобразователя U1. При превышении входным сигналом, подаваемым на инвертирующий вход операционного усилителя, порога переключения компаратора, на его выходе мгновенно устанавливается напряжение низкого уровня - Uнас≅ - (12÷13) В. При формировании компаратором SF1 знакопеременного сигнала интегрирующее звено в соответствии со своими физическими свойствами формирует пилообразное напряжение. Постоянные времени τн+ и τн- интегрирующего звена подобраны таким образом, что при токе реле, превышающем уставку по срабатыванию, напряжение на конденсаторе С2 изменяется в узком и заранее известном диапазоне: - Uогр. VD2≤u<Uв SF2. Это напряжение подаётся на вход гистерезисного компаратора SF2.

Входной преобразователь вида сигнала U1 выполнен на основе промежуточного трансформатора тока ТА, выпрямительного моста VS1 и резистора нагрузки R1. Коэффициент трансформации трансформатора тока ТА и резистор R1 определяются конкретным диапазоном уставок реле.

С целью исключения проникновения помех через межобмоточную ёмкость трансформатора тока ТА в измерительную часть реле в трансфор-

маторе тока предусматривается электростатическое экранирование вторичной обмотки.

Экран соединяется с точкой нулевого потенциала измерительной части реле (точка “Э” на печатной плате).

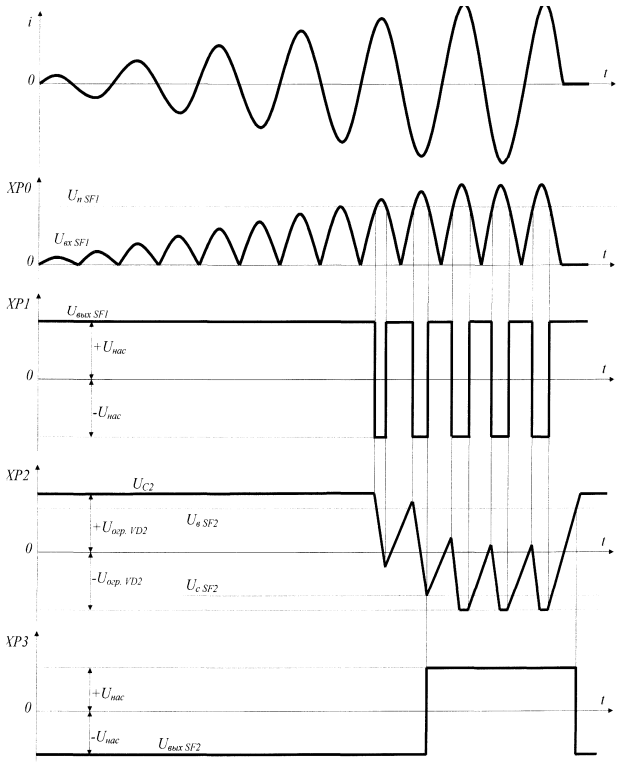


Рис. 6. Временные диаграммы реле РСТ-13.

Компаратор SF1 выполнен на базе операционного усилителя DA1. В режиме ожидания, то есть при относительно малом входном токе реле, компаратор SF1 находится в устойчивом состоянии, для которого характерно наличие на его выходе положительного напряжения насыщения операционного усилителя +Uнас≅ (Еп - 1,5) В. Компаратор SF2 реализован на операционном усилителе DA2 и имеет симметричную гистерезисную характеристику.

Порог переключения компаратора зависит от напряжения, действующего в данный момент на выходе операционного усилителя, которое по цепи обратной положительной связи (делитель напряжения R15, R16) подаётся на неинвертирующий вход операционного усилителя.

Таким образом, в исходном состоянии на выходе SF2 присутствует -Uнас..

Так как ширина петли гистерезиса с запасом превышает выше отмеченный диапазон колебания напряжения на входе компаратора в режиме срабатывания, то это исключает возможность дребезга реле, даже если оно находится на грани срабатывания.

Положительное напряжение + Uнас.≅ (12÷13)В в режиме срабатывания с выхода SF2 подаётся на базу транзистора VT1 и переводит его в режим насыщения, обеспечивая протекание тока через обмотку выходного реле KL.

При отсутствии тока на входе реле напряжение на выходе компаратора SF1 максимальное положительное (+15 В) и до величины этого напряжения заряжен конденсатор С2.

При наличии входного тока он проходит через промежуточный трансформатор тока ТА1 и выпрямитель VS1 и в те моменты времени, когда мгновенное значение выпрямленного тока на инвертирующем входе компаратора SF1 превышает напряжение порога, определяемого напряжением на резисторах R6 - R13, на выходе компаратора появляется максимальное отрицательное напряжение (-15 В).

Это отрицательное напряжение быстро перезаряжает конденсатор С2 через параллельно включённые резистор R7 и резистор R8, подключаемый в цепь перезаряда через диод VD2.

В те промежутки времени, когда мгновенное значение выпрямленного сигнала ниже порога, на выходе компаратора вновь появляется положительное напряжение, диод VD2 запирается и конденсатор С2 медленно заряжается через резистор R7, так как сопротивление резистора R7 примерно в три раза больше сопротивления резистора R8 (237 кОм и 95,3 кОм соответственно).

При увеличении амплитуды входного сигнала время перезаряда конденсатора С2 отрицательным напряжением увеличивается, а время заряда положительным напряжением - уменьшается. Амплитуда отрицательного напряжения при этом увеличивается, а положительного - снижается.

При токе срабатывания амплитуда на С2 достигает отрицательного порога срабатывания триггера Шмитта SF2, который после этого переключается и напряжение на его выходе скачком становится положительным.

Это положительное напряжение через резистор R17 открывает транзистор VT1, что приводит к срабатыванию выходного реле KL, и через делитель напряжения R15 - R16 делает положительным напряжение на входе триггера Шмитта.

Так как амплитуда положительного напряжения на конденсаторе С2 при этом ниже вновь установившегося порога, триггер Шмитта SF2 и выходное реле KLостаются в устойчивом сработанном состоянии.

Разработка средств тестового контроля статического реле направления мощности серии РСМ-13

Устройства релейной защиты (в отличие от устройств непрерывного действия) могут быть отнесены к устройствам со статической готовностью к действию. Релейная защита выполняет свои функции по требованию, которым является режим короткого замыкания или иное нарушение нормального режима работы защищаемого оборудования.

Поэтому необходимо различать отказ устройства защиты как событие утраты работоспособности и отказ функционирования как событие невыполнения заданной функции при возникновении соответствующего требования.

В общем случае отказ устройства происходит не одновременно с возникновением требования к функционированию и, следовательно, отказ функционирования может быть предотвращён, если в интервале между моментом возникновения отказа и моментом возникновения требования будет проведена профилактическая проверка.

Поэтому поток отказов функционирования зависит не только от потока отказов устройства, но и от организации технического обслуживания, а также от качества проведения проверки.

Кроме того, поскольку отказ устройства может превратиться в отказ функционирования лишь при возникновении требования к функционированию, то поток отказов функционирования зависит и от потока требований к функционированию.

Конструктивным исполнением полупроводникового реле мощности типа РСМ-13 предусмотрено наличие контрольных точек, предназначенных для определения исправности отдельных функциональных узлов реле.

Временные векторные диаграммы в контрольных точках позволяют определить степень исправности реле при проведении очередного профилактического контроля.

Отказы, возникающие в промежутке между очередными видами профилактического контроля, могут привести к ложному срабатыванию устройства защиты.

В связи с этим становится актуальной проблема создания средств автоматизированного профилактического контроля работоспособности отдельных узлов и элементов реле с выдачей соответствующих информационных и блокирующих воздействий при возникновении неисправностей.

Проведённый анализ сигналов в контрольных точках, а также анализ отказов за период эксплуатации, позволяют сделать вывод, что об исправной работе полупроводниковой части реле в целом можно судить по наличию разнополярных импульсов в контрольной точке XP5. Разнополярные импульсы присутствуют как в режиме холостого хода, так и в режиме срабатывания реле.

В соответствии с этим предлагается устройство встроенного диагностического контроля, позволяющего производить контроль за работоспособностью реле в процессе эксплуатации.

Принципиальная электрическая схема реле типа РСМ-13 с учётом возможности тестового контроля показана на рис. 7. Устройство встроенного тестового контроля отмечено серым фоном.

Предлагаемое устройство работает следующим образом. При наличии разнополярных импульсов, характерных для нормальной работы реле, на обоих входах микросхемы DA9.3 через диоды VD14 и VD15 появляется сигнал положительной полярности, что соответствует отсутствию сигнала на выходе микросхемы DA9.3 и входе выходного транзистора VT4 (при этом отрицательная полуволна подаётся на вход микросхемы DA9.3 через инвертор, выполненный на микросхеме DA9.1).

В этом случае транзистор VT4 закрыт и реле KL2 находится в обесточенном состоянии. При этом реле блокировки KL2 не препятствует нормальной работе реле. При возникновении повреждения в полупроводниковой части реле в контрольной точке XP5 появляется импульс одной из полярностей.

В этом случае на входе микросхемы DA9.3 имеется только один из двух сигналов, на выходе микросхемы DA9.3 появляется положительный сигнал, транзистор VT4 открывается и реле KL2 срабатывает.

При этом реле контакты KL2.1 и KL2.2 блокируют работу резервной защиты, а контакты KL2.3 обеспечивают выдачу сигнала «Неисправность элементной базы резервной защиты». Конденсаторы C18 и C19 обеспечивают наличие сигнала во время бестоковых пауз на выходе диодов VD14 и VD15.

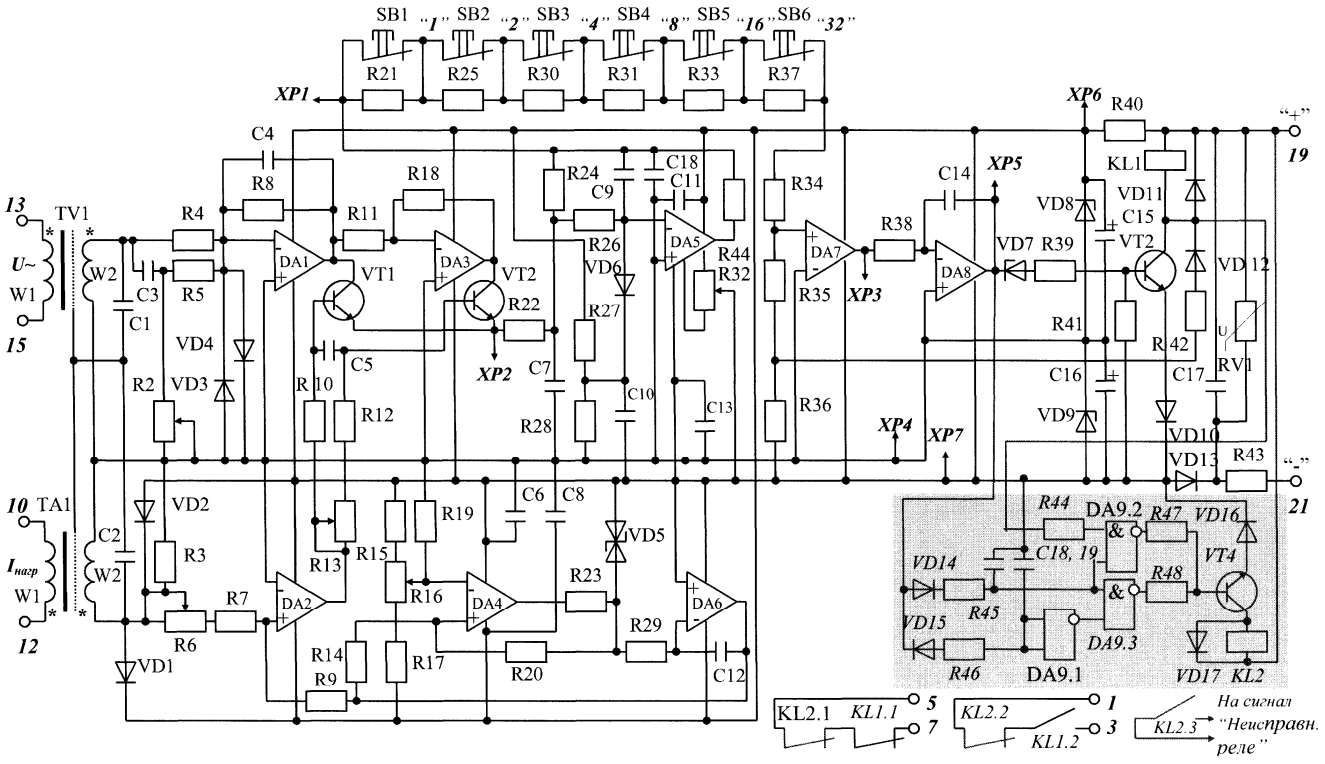


Рис. 7. Принципиальная электрическая схема реле серии РСМ-13 с учётом возможности тестового контроля.

Учитывая вероятность пробоя выходного транзистора VT3 и ложное срабатывание защиты по этой причине, в схеме устройства диагностического контроля предусмотрена схема DA9.2. Анализ временных характеристик реле показывает, что правильной работе элементов и функциональных узлов реле при срабатывании соответствует наличие положительной полуволны с соответствующей скважностью в контрольной точке XP5, а значит и положительного сигнала на выходе диода VD14, и отрицательного сигнала в коллекторной цепи выходного транзистора реле VT3.

При этом на выходе микросхемы DA9.2 появляется инверсионный отрицательный сигнал, транзистор VT4 остаётся закрытым и работа схемы реле осуществляется в нормальном режиме.

При несоответствии вышеуказанных условий транзистор VT4 открывается, реле KL2 срабатывает, что, в свою очередь, приводит к блокировке реле и выдаче соответствующего информационного сигнала.

Таким образом, предлагаемое устройство тестового контроля обеспечивает выявление повреждений и предотвращение ложного срабатывания защиты на любой стадии её работы.

Разработка средств тестового контроля статического реле тока серии РСТ-13

Проведённый анализ сигналов в контрольных точках, а также анализ отказов за период эксплуатации, позволяют сделать вывод, что об исправной работе полупроводниковой части реле в целом в режиме срабатывания можно судить по наличию положительного сигнала в контрольных точках XP1 и XP2, отрицательного сигнала в контрольной точке XP3 и положительного сигнала в цепи коллектора транзистора VT1 при токах, меньших тока срабатывания, и по наличию интегрального отрицательного сигнала в контрольных точках XP1 и XP2, положительного сигнала в контрольной точке XP3 и отрицательного сигнала в цепи коллектора транзистора VT1 при токах, соответствующих и больших тока срабатывания реле.

Интегрирующие цепочки выполнены на элементах VD15, R29, R30, C8 и VD16, R31, R32, C9 соответственно.

Принципиальная электрическая схема реле типа РСТ-13 с учётом возможности тестового контроля показана на рис. 8. Устройство встроенного тестового контроля отмечено серым фоном.

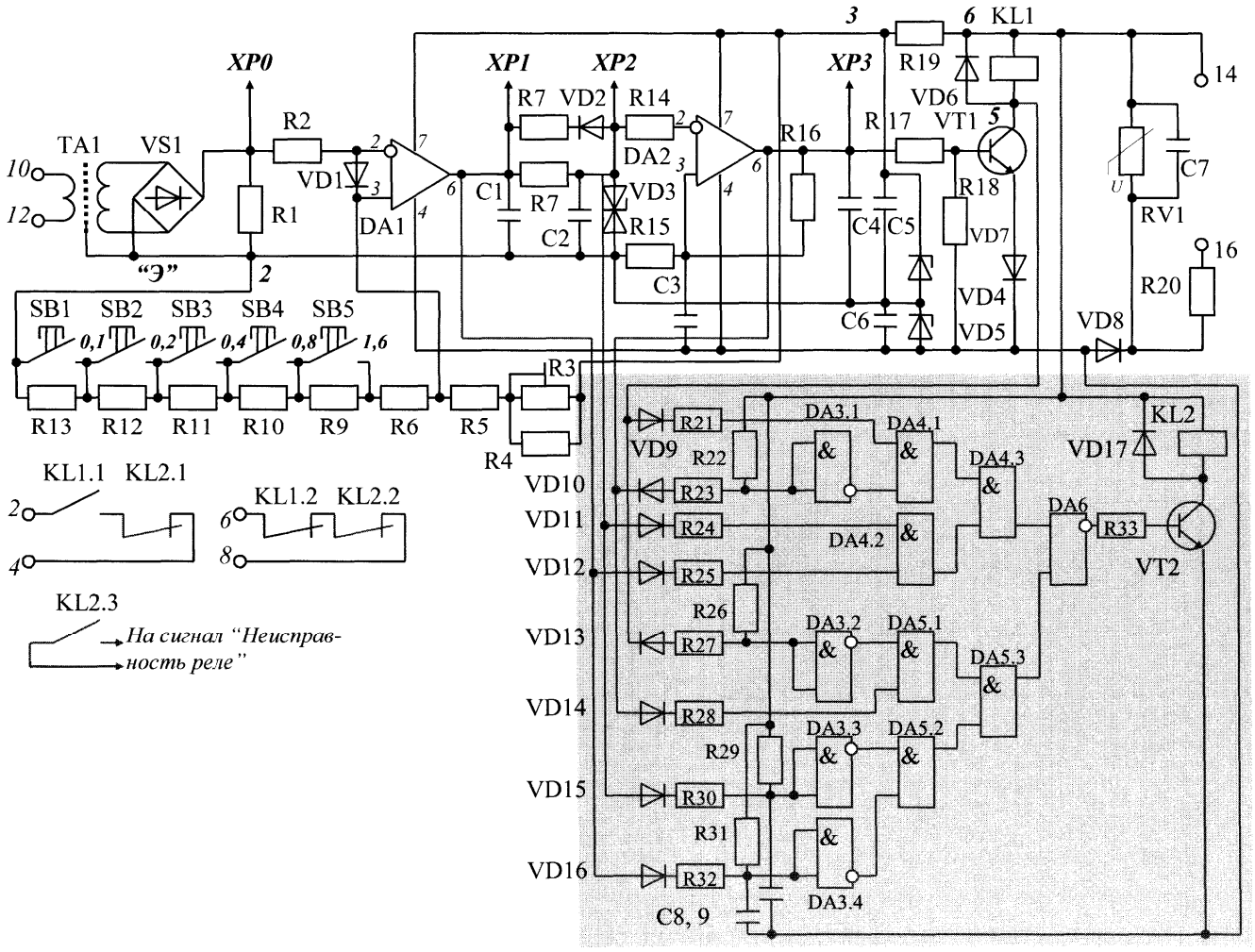


Рис. 8. Принципиальная электрическая схема реле серии РСТ-13 с учётом возможности тестового контроля.

В режиме, соответствующем току. меньшему тока срабатывания реле, в контрольной точке XP1 имеется постоянное положительное напряжение +Uнас , в контрольной точке XP2 – постоянное положительное напряжение +Uогр VD2, в контрольной точке XP3 – постоянное отрицательное напряжение –Uнас, а в коллекторной цепи транзистора VT1 присутствует положительное напряжение.

Схему тестового контроля можно условно разбить на три функциональных узла, один из которых контролирует исправную работу реле в режиме готовности к срабатыванию, другой – в режиме срабатывания реле, а третий является выходным органом устройства блокировки.

В состав первого функционального узла входят микросхемы DA3.1 и DA4, диоды VD9÷VD12 и сопротивления R21÷R25. Ввиду того, что в данном режиме транзистор VT1 должен находиться в закрытом состоянии, на его коллекторе присутствует положительный сигнал, который через диод VD9 и сопротивление R21 подаётся на вход микросхемы DA4.1. В контрольной точке XP3 при этом присутствует постоянное отрицательное напряжение, которое через диод VD10 и сопротивление R23 подаётся на вход инвертора, выполненного на микросхеме DA3.1. Сопротивление R22 обеспечивает начальное смещение на входе инвертора, необходимое для выявления режима повреждения реле в режиме готовности к срабатыванию. Таким образом, при исправной работе реле на обоих входах микросхемы DA4.1 имеются оба положительных сигнала и на вход микросхемы DA4.1 подаётся положительный сигнал.

В контрольных точках XP1 и XP2 при исправной работе реле имеется положительное напряжение, подаваемое на вход микросхемы DA4.2 через диоды VD11 и VD12 и сопротивления R24 и R25. При этом на выходе микросхемы DA4.2 имеется положительное напряжение.

Таким образом, при исправной работе реле на выходе микросхемы DA4.3 присутствует положительное напряжение, которое подаётся на

выходной блок устройства блокировки. При этом транзистор VT2 будет закрыт, а реле блокировки KL2 – в обесточенном состоянии. При возникновении любой неисправности в элементной части схемы реле на одном или нескольких входах (в зависимости от характера повреждения) микросхем DA4.1 или DA4.2 появляется отрицательный сигнал, что, в свою очередь, приводит к открытию выходного транзистора устройства блокировки VT2 и срабатыванию реле блокировки KL2. При этом происходит блокировка выходного реле защиты РСТ-13 и обеспечивается выдача информационного сигнала о неисправности защиты.

Второй функциональный блок устройства тестового контроля обеспечивает контроль исправности работы реле в момент его срабатывания и разрешает срабатывание реле при отсутствии повреждений. В его состав входят DA3 и DA5, диоды VD13÷VD16, сопротивления R26÷R32 и конденсаторы C8 и C9. Сопротивления R26, R29, и R31 обеспечивают начальное положительное смещение на входах инверторов DA3.2, DA3.3 и DA3.4. Конденсаторы C8 и C9 обеспечивают интегрирование отрицательной составляющей выходного сигнала контрольных точек XP1 и XP2.

При нормальной работе реле в режиме срабатывания на всех входах микросхемы DA5 появляются положительные сигналы. Транзистор VT2 при этом остаётся закрытым, а реле блокировки KL2 в обесточенном состоянии.

При возникновении любой неисправности в элементной части схемы реле в момент срабатывания на одном или нескольких входах (в зависимости от характера повреждения) микросхем DA5.1 или DA5.2 появляется отрицательный сигнал, что, в свою очередь, приводит к открытию выходного транзистора устройства блокировки VT2 и срабатыванию реле блокировки KL2. При этом происходит блокировка выходного реле защиты РСТ-13 и обеспечивается выдача информационного сигнала о неисправности защиты.

Таким образом, предлагаемое устройство тестового контроля обеспечивает выявление повреждений и предотвращение ложного срабатывания защиты на любой стадии её работы.

Заключение

Полупроводниковая элементная база обладает относительно низкой эксплуатационной надёжностью, что может являться причиной ложных срабатываний защиты, а в отдельных случаях и отключения основного оборудования энергоблока.

Предлагаемые устройства тестового контроля статических реле обеспечивают выявление повреждений и предотвращение ложного срабатывания защиты на любой стадии её работы.

Список литературы

1. Линт Г.Э. Серийные реле защиты, выполненные на интегральных микросхемах / Г.Э. Линт. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 112 с.:ил.
2. Методические указания по техническому обслуживанию токовых реле РСМ-13. РД153.34.0-35.645-97 – М.: СлужбапередовогоопытаОРГРЭС, 1999. – 48 с.:ил.
3. Методические указания по техническому обслуживанию токовых реле РСТ-11 – РСТ-14,реле напряжения РСН-14 – РСН-17 и РСН-11, РСН-12 и РСН-18. РД34.35.644-97 – М.: Служба передового опыта ОРГРЭС, 1998. – 52 с.:ил.

References

1. Lint G.E. Serial protection relays made on integrated circuits / G.E. Lint. - M.: Energoatomizdat, 1990. - 112 p.: Ill.
2. Guidelines for the technical maintenance of current relays PCM-13. РД153.34.0-35.645-97 - M.:ORGRES Excellence Service, 1999. - 48 p.:ill.
3. Guidelines for the technical maintenance of current relays PCT-11 - PCT-14, voltage relay PCH-14 - PCH-17 and PCH-11, PCH-12 and PCH-18. РД34.35.644-97 - M.: ORGRES Excellence Service, 1998. - 52 p.:ill.

УДК 621.316.718

Трансформатор постоянного тока

Л. Н. Канов[1], Н. С. Кутовой[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, lnkanov48@mail.ru

Статья поступила 22.10.2019 г.; после доработки 24.10.2019 г.

Аннотация

Предложена конструкция преобразователя постоянного тока в переменный, состоящая из составного магнитопровода и вращающегося диска с магнитными вставками. Построено математическое описание, рассчитаны режимы работы преобразователя. Создана физическая модель, получена осциллограмма напряжения, подтверждающая работоспособность предлагаемого преобразователя.

Ключевые слова: преобразователь напряжения, математическое описание, насыщение магнитопровода, токи в обмотках, выходное переменное напряжение.

Transformer of Direct-current

L.N. Kanov[1], N.S. Kutovoy[2]
Sevastopol State University, 33, Universitetskaua st., Sevastopol, 299053, Russia lnkanov48@mail.ru

Received 22.10.2019 y.; received in final form 24.10.2019 y.

Abstract

The construction of transformer of direct current is offered in alternatig current, consisting of component magneticcore and revolved disk with magnetic insertions. Mathematical description is built, the modes of operations of transformer are expected. A physical model is created, the oscillogram of tension, confirmative the capacity of the offered transformer, is got.

Keywords: a transformer of tension, mathematical description, satiation of magneticcore, currents in winding, output variable tension.

Введение

Современная энергетика основана на передаче энергии на большие расстояния линиями передач постоянного тока высокого напряжения. Это обуславливается сравнительно низкими потерями в процессе передачи. Постоянный ток непосредственно применяется в электрохимическом производстве, в городском и железнодорожном транспорте. Однако преимущественное использование в электроприводе, промышленности, бытовой технике находит переменный ток ввиду возможностей простого и с малыми потерями преобразования. В связи с этим актуальной является задача преобразования постоянного тока в переменный [1].

Существует распространенный электромеханический способ подобного преобразования: пара двигатель постоянного тока – синхронный генератор. Двигатель получает питание от сети постоянного тока и приводит во вращение генератор, производящий электроэнергию переменного тока. Существенным недостатком такого способа является наличие двигателя постоянного тока, имеющего достаточно сложную конструкцию, невысокую надежность и трудности в обслуживании и эксплуатации, связанные с наличием контактно – щеточного аппарата [2].

Весьма перспективным и достаточно быстро развивающимся средством преобразования постоянного тока в переменный являются статические преобразователи – инверторы на мощных полупроводниковых приборах [3, 4]. Такие устройства надежны, экономичны и применяются в электротехнологиях, на транспорте. При всех достоинствах у полупроводниковых преобразователей имеет место существенный недостаток – богатый спектр гармоник выходного переменного напряжения, что существенно усложняет их использование.

Электромеханические преобразователи постоянного напряжения в переменное небольшой мощности применяются в электроизмерительной технике [5]. У индуктивных преобразователей входной величиной является перемещение сердечника или обмоток, а выходной – изменение индуктивности или взаимной индуктивности обмоток. При этом в обмотках наводится электродвижущая сила, пропорциональная скорости изменения индуктивности. Обычно применяются дифференциальные преобразователи, обладающие большей линейностью характеристики. Общим недостатком индуктивных измерительных преобразователей является сравнительно небольшая мощность, что препятствует их применению в электроэнергетике.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка конструкции и моделирование действия электромеханического преобразователя постоянного тока в переменный (трансформатора постоянного тока) для электроснабжения потребителей переменного тока.

Для достижения этой цели предложена конструкция электромеханического преобразователя, основанная на изменении магнитного сопротивления магнитопровода; оценены конструктивные параметры преобразователя; построена математическая модель преобразователя, на основании которой выполнено математическое моделирование процесса преобразования постоянного напряжения питания в переменное выходное напряжение нагрузки.

Конструкция электромеханического преобразователя

Предлагаемый преобразователь состоит из разрезанного на две части шихтованного магнитопровода 4, рис.1. В зазоре магнитопровода на оси 3 установлен немагнитный диск 6, в который по окружности запрессованы ферромагнитные вставки 5. При вращении диска вставки попарно перекрывают зазор, что приводит к периодическому изменению магнитного сопротивления сердечника.

Входная обмотка возбуждения получает питание от источника постоянного напряжения, нагрузка подсоединена к выходной обмотке. При вращении диска изменение магнитного сопротивления приводит к периодическим колебаниям магнитного потока и к появлению ЭДС на обмотках. Частота этой ЭДС определяется скоростью вращения диска.

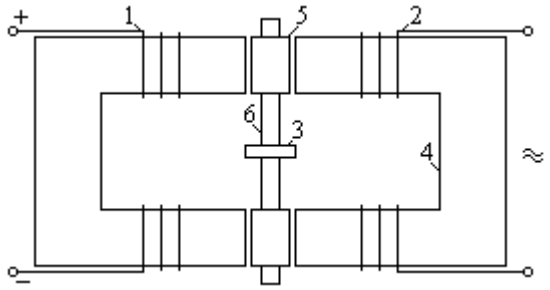


Рис. 1. Устройство преобразователя:
1, 2 – первичная и вторичная обмотки;
3 – ось вращения диска; 4 – составной магнитопровод; 5 – магнитные вставки; 6 – немагнитный диск.

Математическая модель преобразователя

Электрическая схема электромеханического преобразователя изображена на рис.2.

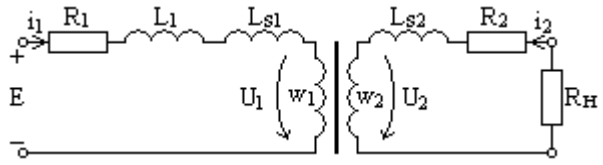


Рис. 2. Электрическая схема преобразователя.

На рисунке обозначены: w_1 – обмотка возбуждения на стороне постоянного тока; w_2 – выходная обмотка на стороне нагрузки переменного тока; R_1, R_2, $R_н$ – сопротивления обмоток и нагрузки соответственно; L_{s1}, L_{s2} – индуктивности рассеяния обмоток; L_1 – дополнительная индуктивность в цепи обмотки возбуждения, предназначенная для подавления пульсаций в цепи постоянного тока.

Схема замещения магнитной цепи преобразователя изображена на рис.3, где обозначены:

$F = w_1 i_1 + w_2 i_2$ – магнитодвижущая сила обмоток; $R_{mc}(i_1, i_2)$ – нелинейное магнитное сопротивление сердечника; $R_{mm}(t, i_1, i_2)$ – нелинейное переменное магнитное сопротивление ферромагнитной вставки; $R_{m\delta 1}, R_{m\delta 2}$ – магнитные сопротивления зазоров обеих сторон вставки; Φ – магнитный поток.

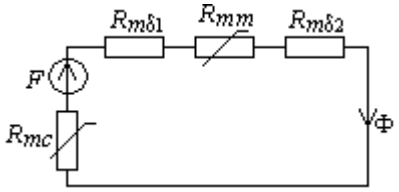


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи Преобразователя.

Суммарную вебер-амперную характеристику магнитной цепи преобразователя, определяемую сложением характеристик магнитных сопротивлений $R_{mc}, R_{mm}, R_{m\delta 1}, R_{m\delta 2}$, с учетом насыщения аппроксимируем выражением

$$\Phi = a \cdot arctg\, bF + c \cdot F, \qquad (1)$$

где a, b, c – коэффициенты аппроксимации.

Вследствие вращения диска ферромагнитные вставки изменяют магнитное сопротивление преобразователя, и его вебер-амперная характеристика перемещается между двумя крайними положениями (рис.4): 1 – вставка находится в зазоре между половинами сердечника, общее магнитное сопротивление минимально и определяется только $R_{mc}, R_{m\delta 1}, R_{m\delta 2}$, так как магнитное сопротивление вставки невелико; 2 – вставка полностью выходит из области зазора, и общее магнитное сопротивление максимально.

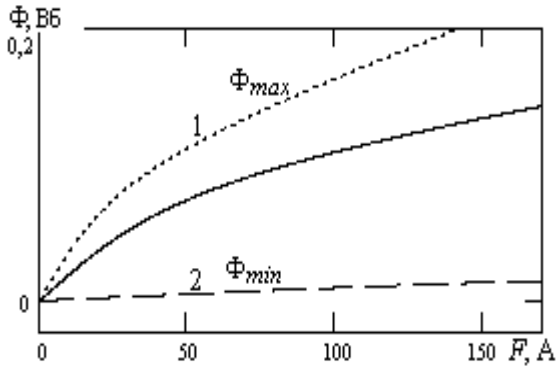


Рис. 4. Вебер-амперная характеристика магнитной цепи преобразователя.

В выражении (1) это обстоятельство отражается зависимостями коэффициентов аппроксимации от времени

$$b(t) = b_0 + b_m \sin\omega t;\ c(t) = c_0 + c_m \sin\omega t. \qquad (2)$$

Расчет выполнен при следующих значениях коэффициентов аппроксимации:

$$a = 0{,}15;\ b_0 = 0{,}027;\ b_m = 0{,}024;$$

$$c_0 = 9 \cdot 10^{-4};\ c_m = 1{,}1 \cdot 10^{-3}.$$

Таким образом, при неизменной величине магнитодвижущей силы F магнитный поток изменяется в диапазоне от $\Phi_{\min}$ до $\Phi_{\max}$, так что поток является функцией трех переменных $\Phi = \Phi(t, i_1, i_2)$.

Определим скорость изменения магнитного потока от времени с учетом зависимостей от времени токов $i_1(t), i_2(t)$ и коэффициентов (2):

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{a}{1 + (bF)^2} \cdot \frac{d}{dt}(bF) + \frac{d}{dt}(cF).$$

После преобразований получаем

$$\frac{d\Phi}{dt} = \left(w_1 \frac{di_1}{dt} + w_2 \frac{di_2}{dt} \right) \cdot S_1 + S_2, \qquad (3)$$

где обозначены:

$$S_1(t, i_1, i_2) = \frac{a \cdot b(t)}{S_3(t, i_1, i_2)} + c(t);$$

$$S_2(t, i_1, i_2) = F \cdot \omega \cdot \cos\omega t \cdot \left(\frac{a \cdot b_m}{S_3(t, i_1, i_2)} + c_m \right);$$

$$S_3(t, i_1, i_2) = 1 + \left(b(t) \cdot F(i_1, i_2) \right)^2.$$

В соответствии с рис.2 для обеих обмоток получаем уравнения

$$E = R_1 i_1 + (L_1 + L_{s1}) \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi}{dt};$$

$$0 = (R_2 + R_н) i_2 + L_{s2} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \qquad (4)$$

С учетом выражения производной потока (3) находим уравнения для токов, пригодные для моделирования

$$\frac{di_1}{dt} = \frac{\Delta_1(t, i_1, i_2)}{\Delta(t, i_1, i_2)};\ \frac{di_2}{dt} = \frac{\Delta_2(t, i_1, i_2)}{\Delta(t, i_1, i_2)}, \qquad (5)$$

где

$$\Delta(t, i_1, i_2) = \begin{vmatrix} L_{s1} + L_1 + w_1^2 S_1 & w_1 w_2 S_1 \\ w_1 w_2 S_1 & L_{s2} + w_2^2 S_1 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_1(t,i_1,i_2)=\begin{vmatrix} f_1(t,i_1,i_2) & w_1w_2S_1 \\ f_2(t,i_1,i_2) & L_{s2}+w_2^2S_1 \end{vmatrix};$$

$$\Delta_2(t,i_1,i_2)=\begin{vmatrix} L_{s1}+L_1+w_1^2S_1 & f_1(t,i_1,i_2) \\ w_1w_2S_1 & f_2(t,i_1,i_2) \end{vmatrix};$$

$$f_1(t,i_1,i_2)=E-R_1i_1-w_1S_2(t,i_1,i_2);$$

$$f_2(t,i_1,i_2)=-(R_2+R_н)i_2-w_2S_2(t,i_1,i_2).$$

Обсуждение результатов моделирования

На рис.5 изображены графики токов и магнитного потока в зависимости от времени, рассчитанные в среде *MathCad* по уравнениям (5) при следующих параметрах лабораторной модели преобразователя

$E=30$ В; $L_1=29$ Гн; $L_{s1}=0{,}0095$ Гн;

$L_{s2}=0{,}005$ Гн; $R_н=10$ Ом; $\omega=314$ с$^{-1}$.

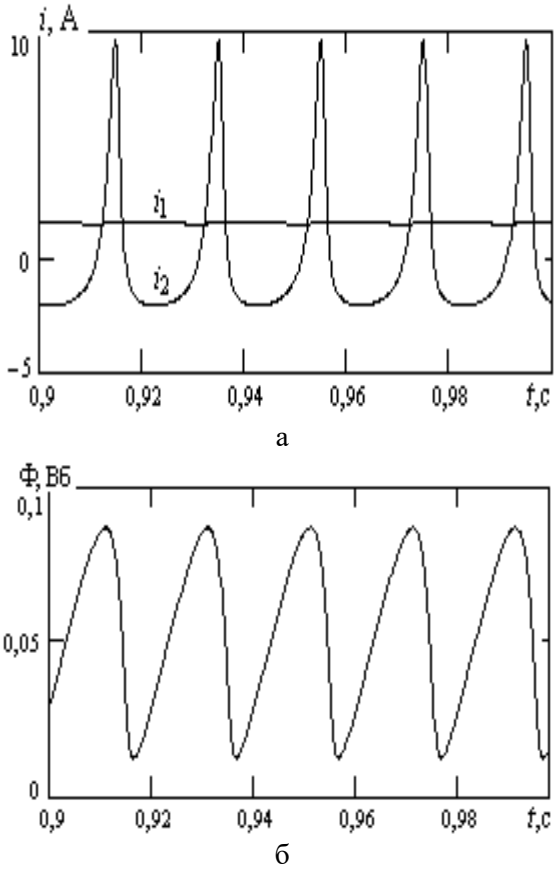


Рис. 5. Режим работы преобразователя:
а) графики токов в обмотках; б) магнитный поток.

Графики показывают, что магнитный поток при вращении диска изменяется в пределах от 15 мВб до 90 мВб; ток в первичной обмотке остается практически неизменным вследствие наличия большой индуктивности.

Ток в выходной обмотке имеет частоту 50 Гц и содержит высшие гармоники, что объясняется односторонним намагничиванием сердечника.

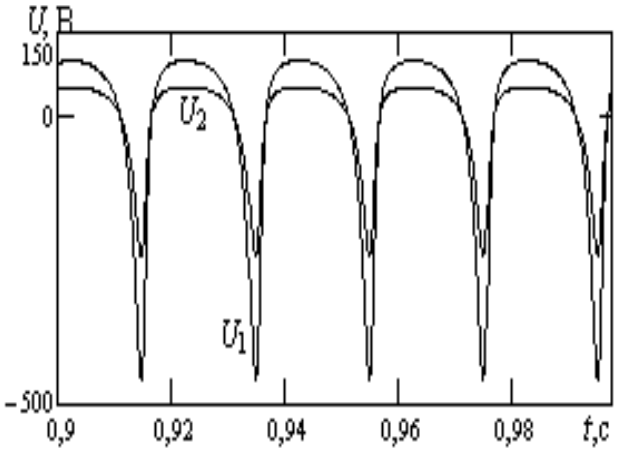


Рис. 6. Напряжения на обмотках преобразователяю.

На рис.6 изображены графики напряжений на обмотках. Амплитуда напряжения на первичной обмотке достигает 450 В, на вторичной – 250 В, что объясняется различием в числах витков обмоток.

Заключение

В статье предложена конструкция трансформатора постоянного тока – преобразователя постоянного напряжения в переменное.

Приведены результаты расчетов, подтверждающие работоспособность преобразователя.

Конструкция преобразователя по сравнению со статическими устройствами менее дорогая и позволяет использовать его для больших мощностей.

Перспективным направлением дальнейшей работы является усовершенствование схемы преобразователя для снижения числа высших гармоник выходного напряжения.

Список литературы

1. Касаткин А.С. Электротехника / А.С.Касаткин, М.В.Немцов. – М.: изд-во «Высшая школа», 2002. 542 с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: изд-во «Энергия», 1974. 840 с.
3. Багинский Б.А. Бестрансформаторные преобразователи переменного напряжения в постоянное. – Томск: изд-во ТГУ, 1990. 224 с.
4. Белов В.Г. Высокочастотные тиристорно-транзисторные преобразователи постоянного напряжения. – М.: Энергоатомиздат, 1978. 120 с.

5. Турчинин А.М. Электрические измерения неэлектрических величин. – Л.: изд-во «Энергия», 1966. 670 с.

References

1. Kasatkin A.S. *Elektrotehnika* [Electrical engineering]. Moscow: Izd. “Higher school”, 2002. – 542 p.
2. Voldek A.I. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Leningrsd: Izd. “Energiya”, 1974. – 840 p.
3. Baginskii B.A. *Bestrasformatornye preobpazovateli peremennogo napryadzeniya v postoyznnoe* [Untransform transformers of alternativ tension in direct]. Tomsk: Izd.TGU,1990. – 224 p.
4. Belov V.G. *Vysokochastotnye tiristorno-tranzistornye preobrazovateli postoyannogo napryzzheniya* [High-frequency thiristor-transistor transformers of direct tension].]. Moscow: Izd. “Energoatomizdat”, 1978. – 120 p.
5. Turchinin A.M. *Elektricheskie izmereniya neelektricheskih velichin* [Electric measurings of unelectric sizes].]. Leningrsd: Izd. “Energiya”, 1966. – 670 p.

УДК 621.316.718

Стоячие волны напряжения в контактной сети городского электротранспорта

Л.Н. Канов[1], А.В. Солодкий[2]
[1]*ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, lnkanov48@mail.ru*
[2]*ГУП «Севэлектроавтотранс», ул. Толстого, 51, г. Севастополь, 299053, Россия*

Статья поступила 18.10.2019 г.; после доработки 22.10.2019 г.

Аннотация

Построено математическое описание двухпроводной контактной сети городского электротранспорта с движущимися транспортными средствами. Показана возможность появления в линии стоячих волн напряжения гармоник, кратных трем. Выполнен расчет стоячих волн, обусловленных движением по дистанции транспортных средств. Оценена возможность подавления стоячих волн.

Ключевые слова: контактная сеть, движущееся транспортное средство, математическое моделирование, стоячие волны напряжения, третья гармоника, волновое сопротивление.

Standings waves of Tension in the Contact network of City electrotransport

L.N. Kanov[1], A.V. Solodkiy[2]
[1]*Sevastopol State University, 33, Universitetskaua st., Sevastopol, 299053, Russia, lnkanov48@mail.ru*
[2]*GUP "Sevelektroavtotrans", 51, Tolstogo st., Sevastopol, 299053, Russia*

The article acted 18.10.2019 y.; after a revision 22.10.2019 y.

Abstract

Mathematical description of twowires contact network of city electrotransport is built with locomotive transport vehicles. Possibility is showed of appearance in the line of standings waves of tension of harmonics, multiple three. The calculation of standings waves, conditioned motion on distance of transport vehicles is executed. Possibility of suppression of standings waves is appraised.

Keywords: contact network, moving transport vehicle, mathematical design, standings waves of tension, third harmonic, wave impendance.

Введение

Повышение эффективности городского электротранспорта в последнее время привлекает внимание исследователей [1].

Актуальность проблемы связана с улучшением эксплуатационных свойств электроприводов троллейбусов, оснащение их современной контрольно-измерительной и управляющей аппаратурой.

Все это выдвигает новые, повышенные требования к качеству электроэнергии, питающей троллейбусы по двухпроводной контактной линии постоянного тока.

Напряжение на эту линию подается от сети переменного тока 550 В 50 Гц после выпрямителей.

Выходное напряжение выпрямителей кроме полезной постоянной составляющей содержит

спектр гармоник; наибольший вес имеют гармоники, кратные трем: третья, шестая.

Двухпроводная контактная линия электропитания представляет цепь с распределенными параметрами, в которой вследствие неоднородностей в местах контактов с движущимися троллейбусами возникают отраженные волны напряжения гармоник, кратных трем, т.е. возникает эффект стоячих волн [2, 4].

Наличие стоячих волн в линии нежелательно не только тем, что энергия от подстанции в нагрузку передается не полностью, но и тем, что в отдельных точках линии напряжение существенно увеличивается. Это отрицательно сказывается на работе средств автоматики и управления троллейбусом. Особенностью работы городского электротранспорта является его неравномерная загрузка, когда от остановки к остановке меняется количество пассажиров. Вдоль линии также имеют место неоднородности рельефа: спуски и подъемы.

Эти обстоятельства затрудняют анализ режимов стоячих волн и прогнозирование их появления.

Эффективным средством снижения величины стоячих волн является применение дополнительных нагрузок, равных волновому сопротивлению линии [4].

Однако перемещение троллейбусов вдоль линии, их различные нагрузки и условия пути затрудняют решение проблемы.

Цель и задачи исследования

Целью статьи является повышение эффективности эксплуатации городского электротранспорта за счет прогноза и подавления эффекта стоячих волн в контактной сети.

Для достижения этой цели в статье поставлены и решены следующие задачи:

- построение математической модели контактной линии с движущимися на ней троллейбусами с неоднородной нагрузкой;
- расчет стоячих волн при движении троллейбусов по линии с учетом влияния;
- оценка рекомендаций по устранению стоячих волн напряжения.

Математическое описание транспортной ситуации при движении одного троллейбуса на линии

На рис.1 изображена секция контактной сети с движущимся транспортным средством (троллейбусом), который находится в точке с координатой вдоль линии $x = l_1$. Питающая подстанция находится в начале линии при $x = 0$. Длина контактной линии $x = l_d$.

Входное сопротивление на контактах троллейбуса обозначим Z_H. Это комплексное сопротивление является переменным и зависит от частоты гармоники, условий движения и загрузки троллейбуса и является функцией x:

$$\underline{Z}_H(x) = R(x) + jX(x).$$

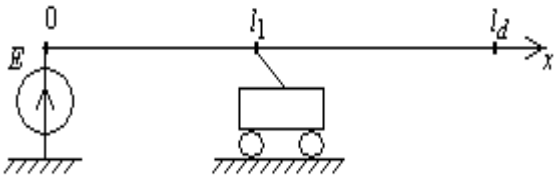


Рис.1. Секция контактной сети.

Контактная линия характеризуется удельными первичными параметрами (на 1 метр длины): r_0 – продольное активное сопротивление проводов; L_0 – продольная индуктивность проводов; g_0 – поперечная проводимость утечки между проводами; C_0 – поперечная межпроводная емкость.

На основании этого получаем вторичные параметры: волновое сопротивление $\underline{Z}_B = \sqrt{\dfrac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$ и коэффициент распространения $\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \alpha + j\beta$, где $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$ – удельное комплексное продольное сопротивление; $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$ – удельная комплексная поперечная проводимость.

Движущий троллейбус вносит неоднородность и делит линию на два участка: первый – по длине от $x = 0$ до $x = l_1$; второй – от $x = l_1$ до конца линии $x = l_d$.

Уравнения для комплексных действующих значений гармоники напряжения и тока на этих участках имеют вид [4]:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1(x) &= \underline{A}_{11} e^{-\underline{\gamma} x} + \underline{A}_{12} e^{\underline{\gamma} x}; \\ \underline{Z}_B \dot{I}_1(x) &= \underline{A}_{11} e^{-\underline{\gamma} x} - \underline{A}_{12} e^{\underline{\gamma} x} \end{aligned} \quad \text{при } x = 0 \ldots l_1; \ (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{U}_2(x) &= \underline{A}_{21} e^{-\underline{\gamma} x} + \underline{A}_{22} e^{\underline{\gamma} x}; \\ \underline{Z}_B \dot{I}_2(x) &= \underline{A}_{21} e^{-\underline{\gamma} x} - \underline{A}_{22} e^{\underline{\gamma} x} \end{aligned} \quad \text{при } x = l_1 \ldots l_d. \ (2)$$

Первые слагаемые в уравнениях (1), (2) представляют падающие волны напряжения и тока, вторые слагаемые – отраженные волны.

Для определения четырех постоянных $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{12}, \underline{A}_{21}, \underline{A}_{22}$ применим граничные условия. В начале первого участка $x = 0$ напряжение определяется выпрямителем подстанции – генератором гармоники напряжения

$\dot{E} = \dot{U}_1(0) = \underline{A}_{11} + \underline{A}_{12}$, откуда $\underline{A}_{12} = \dot{E} - \underline{A}_{11}$

В конце второго участка $x = l_d$ линия разомкнута, ток равен нулю $\dot{I}_2(l_d) = 0$:

$0 = \underline{A}_{21} e^{-\underline{\gamma} l_d} + \underline{A}_{22} e^{\underline{\gamma} l_d}$, откуда $\underline{A}_{21} = \underline{A}_{22} e^{2\underline{\gamma} l_d}$.

В точке $x = l_1$ напряжение $\dot{U}_1(l_1)$ в конце первого участка равно напряжению $\dot{U}_2(l_1)$ в начале второго участка

$$\underline{A}_{11} e^{-\underline{\gamma} l_1} + \underline{A}_{12} e^{\underline{\gamma} l_1} = \underline{A}_{21} e^{-\underline{\gamma} l_1} + \underline{A}_{22} e^{\underline{\gamma} l_1}.$$

Ток линии $\dot{I}_1(l_1)$ в конце первого участка складывается из тока $\dot{I}_2(l_1)$ в начале второго участка и тока троллейбуса $\frac{\dot{U}_2(l_1)}{\underline{Z}_H(l_1)}$:

$$\underline{A}_{11} e^{-\underline{\gamma} l_1} - \underline{A}_{12} e^{\underline{\gamma} l_1} = \underline{A}_{21} e^{-\underline{\gamma} l_1} - \underline{A}_{22} e^{\underline{\gamma} l_1} + \frac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_H(l_1)} \left(\underline{A}_{21} e^{-\underline{\gamma} l_1} + \underline{A}_{22} e^{\underline{\gamma} l_1} \right)$$

Из последних двух уравнений получаем систему для определения $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{22}$

$$\begin{bmatrix} e^{-2\underline{\gamma} l_1} - 1 & -e^{2\underline{\gamma}(l_d - l_1)} - 1 \\ e^{-2\underline{\gamma} l_1} + 1 & -\left(\frac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_H(l_1)} + 1 \right) e^{2\underline{\gamma}(l_d - l_1)} - \frac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_H(l_1)} + 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} \\ \underline{A}_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{E} \\ \dot{E} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Таким образом, постоянные $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{22}$ являются функциями от l_1, l_d и могут быть найдены из системы (3), а из уравнений (1), (2) – действующие значения гармоник напряжения и тока в линии при положении троллейбуса в точке $x = l_1$.

Для определения характерных особенностей напряжения и тока в линии из уравнений (3) выразим постоянную $\underline{A}_{11}$:

$$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{A}_{22} \cdot \left(e^{2\underline{\gamma}(l_d - l_1)} + 1 \right) - \dot{E}}{e^{-2\underline{\gamma} l_1} - 1}.$$

При выполнении условия $e^{-2\underline{\gamma} l_1} = 1$ величина $\underline{A}_{11}$ существенно возрастает.

Выписывая мнимую часть найденного условия, получаем соотношение для определения критических значений l_1: $\sin(2\beta l_1) = 0$, что дает критические точки положения троллейбуса на линии, характеризующиеся значительным увеличением напряжения и тока $l_{1кр} = \frac{k\pi}{\beta}$, $k = 1, 2 \ldots$. В силу условия $\underline{A}_{12} = \dot{E} - \underline{A}_{11}$ те же критические точки существуют для постоянной $\underline{A}_{12}$. Аналогичное выражение для двух других постоянных $\underline{A}_{21}, \underline{A}_{22}$ в критических точках не приводит к чрезмерному увеличению этих постоянных.

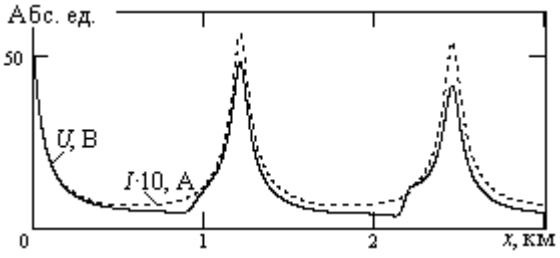


Рис.2. Напряжение и ток на движущемся троллейбусе.

На рис.2 изображены графики зависимостей модулей действующих значений третьей гармоники напряжения и тока на движущемся троллейбусе, построенные по уравнениям (1) – (3) при $0 \le x = l_1 \le l_d$.

Построение выполнено при следующих типичных значениях параметров двухпроводной линии [3, 5, 6]:

$r_0 = 5$ мОм/м; $L_0 = 0{,}2056$ мГн/м; $C_0 = 0{,}035$ мкФ/м; $g_0 = 0{,}4$ мкСм/м; $\underline{Z}_B = 76{,}65$ – j0,524 Ом/м; $E = 50$ В; $\underline{\gamma} = 4{,}795 \cdot 10^{-5} + j2{,}527 \cdot 10^{-3}$;

$$\underline{Z}_H(x) = 7(1 - 3 \cdot 10^{-4} x) + j7 \text{ Ом}.$$

Вещественная часть последнего выражения характеризует снижение сопротивления при увеличении нагрузки.

Рисунок показывают, что по мере движения троллейбуса напряжение гармоники резко увеличивается в критических точках

$$l_{1кр} = \frac{k\pi}{\beta} = \frac{k\pi}{2{,}527 \cdot 10^{-3}} = k \cdot 1243 \text{ м}; \; k = 1, \; 2, \ldots.$$

На рис.3 изображены графики напряжения на втором участке для отдельных моментов времени, куда троллейбус еще не переместился.

Эти графики напряжения и тока на участке перед движущимся троллейбусом также испытывают колебания в критических точках.

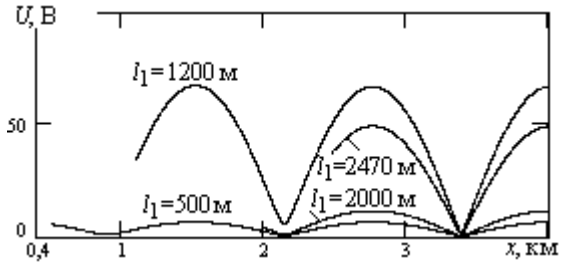


Рис.3. Стоячие волны на втором участке линии.

Средством для снижения эффекта стоячих волн обычно служит подсоединение к концу линии в точке $x = l_d$ сопротивления, равного волновому. Коэффициент отражения от конца линии при этом становится равным нулю, и обратные волны на втором участке не возникают. Граничное условие в точке $x = l_d$ имеет вид $\dot{U}_2(l_d) = \underline{Z}_B \dot{I}_2(l_d)$, откуда, сообразуясь с уравнениями (2) заключаем, что $\underline{A}_{22} = 0$. С учетом выражения $\underline{A}_{12} = \dot{E} - \underline{A}_{11}$ определению подлежат постоянные $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{21}$ из условий в точке $x = l_1$. Система уравнений вида (3) принимает форму

$$\begin{bmatrix} e^{-2\underline{\gamma} l_1} - 1 & -e^{-2\underline{\gamma} l_1} \\ e^{-2\underline{\gamma} l_1} + 1 & -\left(\dfrac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_H(l_1)} + 1\right) e^{-2\underline{\gamma} l_1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{A}_{11} \\ \underline{A}_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\dot{E} \\ \dot{E} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Решение системы (4) дает значения постоянных

$$\underline{A}_{11} = \frac{E\left(2 + \dfrac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_H(l1)}\right)}{2 + \dfrac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_H(l1)}\left(1 - e^{-2\underline{\gamma} l_1}\right)};$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{2E}{2 + \dfrac{\underline{Z}_B}{\underline{Z}_H(l1)}\left(1 - e^{-2\underline{\gamma} l_1}\right)}.$$

Отсюда следует, что при критических значениях координаты x, т.е. при $e^{-2\underline{\gamma} l_{1кр}} = 1$, получаем $\underline{A}_{11} = E\left(1 + \dfrac{\underline{Z}_B}{2\underline{Z}_H(l1)}\right)$, $\underline{A}_{21} = E$. Таким образом, и при включении дополнительного волнового сопротивления на первом участке линии возникают стоячие волны.

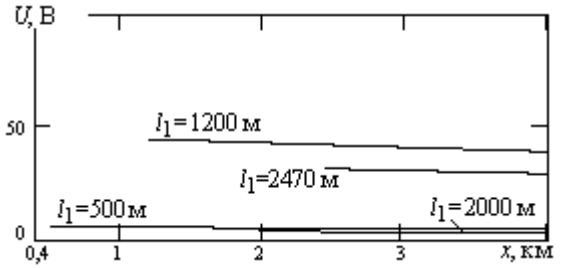


Рис.4. Напряжение на втором участке линии с дополнительным сопротивлением в конце.

На рис.4 изображены графики напряжения, аналогичные изображенным на рис.3, из которых следует, что стоячие волны на втором участке линии не возникают. На первом участке эти графики практически не отличаются от выше рассмотренного случая отсутствия дополнительного волнового сопротивления. Следовательно, обычно применяемый прием устранения стоячих волн не дает ожидаемого эффекта.

Движение двух троллейбусов на линии

На рис.5 изображена секция контактной сети с двумя троллейбусами на ней.

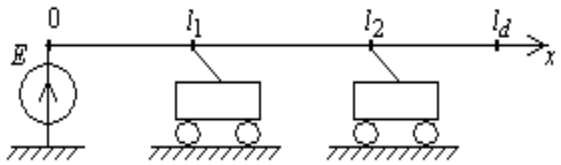


Рис.5. Секция контактной сети при движении двух троллейбусов.

Линия теперь разделяется на три участка точками $x = l_1$ и $x = l_2$. Рассматривается случай без дополнительно включенного в конце линии волнового сопротивления. К уравнениям (1), (2) добавляется уравнение для комплексных действующих значений напряжений и токов третьей гармоники на третьем участке от $x = l_2$ до $x = l_d$:

$$\dot{U}_3(x) = \underline{A}_{31} e^{-\underline{\gamma} x} + \underline{A}_{32} e^{\underline{\gamma} x};$$
$$\underline{Z}_B \dot{I}_3(x) = \underline{A}_{31} e^{-\underline{\gamma} x} - \underline{A}_{32} e^{\underline{\gamma} x} \quad \text{при } x = l_2 ... l_d.$$

Граничные условия в точках $x = l_2$ и $x = l_d$ имеют вид: $\dot{U}_2(l_2) = \dot{U}_3(l_2)$; $\dot{I}_3(l_d) = 0$;

$$\dot{I}_2(l_2) = \dot{I}_3(l_2) + \frac{\dot{U}_3(l_2)}{\underline{Z}_{H2}(l_2)}.$$

Поэтому для определения шести постоянных необходимо решать уравнения для точек $x = l_1$ и $x = l_2$ относительно $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{21}, \underline{A}_{22}, \underline{A}_{32}$ при $\underline{A}_{12} = \dot{E} - \underline{A}_{11}$ и $\underline{A}_{31} = \underline{A}_{32} e^{2\underline{\gamma} l_d}$.

На рис.6 изображены рассчитанные графики напряжения и тока на троллейбусе, движущемся на первом участке от точки $x = 0$ до точки $x = l_1 = 2500$ м и соответствующие графики напряжений и токов второго и третьего участка длинами соответственно 1000 м и 1500 м.

Сопротивление первого троллейбуса принято $\underline{Z}_{H1}(x) = 7(1 - 3 \cdot 10^{-4} x) + j7$ Ом, второго – $\underline{Z}_{H2}(x) = 5(1 - 4 \cdot 10^{-4} x) + j5$ Ом.

Рисунок показывает, что и в этой транспортной ситуации возникают сходные стоячие волны, сопровождающиеся увеличением напряжения на движущемся троллейбусе и на других участках линии.

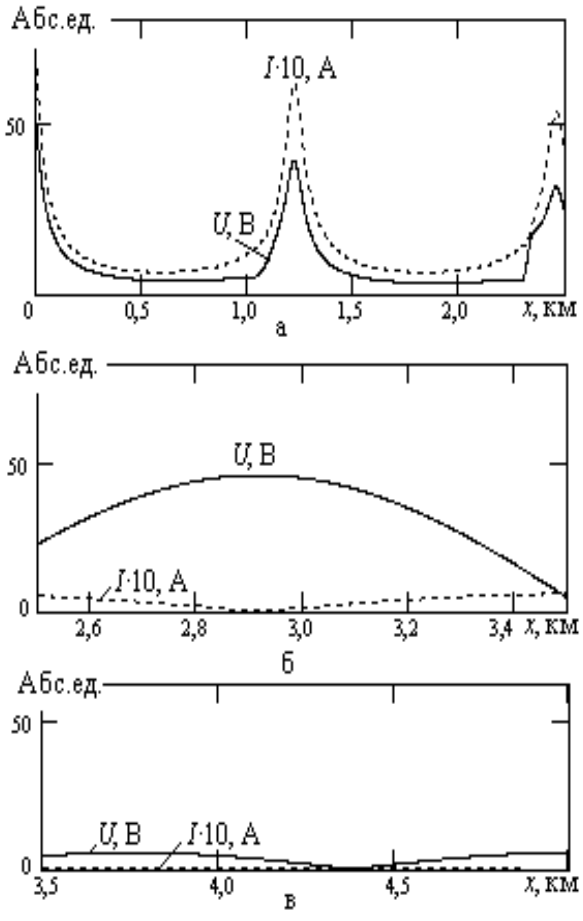


Рис.6. Стоячие волны в линии
с двумя троллейбусами:
а) напряжение и ток на первом троллейбусе;
б) напряжение и ток на втором участке линии;
в) напряжение и ток на третьем участке.

Для устранения стоячих волн на третьем участке следует включать, как и прежде, в конце линии дополнительное волновое сопротивление.

Заключение

В статье представлены результаты математического моделирования напряжения и тока в контактной сети городского электротранспорта. Показано, что в линии возникает режим стоячих волн напряжения и тока на частоте гармоник, кратных трем.

Этот режим сопровождается значительным увеличением напряжения третьей гармоники на движущемся троллейбусе в определенных критических точках линии. Координаты этих точек зависят от первичных параметров линии и загрузки троллейбусов. Возникновение стоячих волн отрицательно влияет на штатную работу электрооборудования троллейбусов.

Для снижения влияния эффекта стоячих волн обычно рекомендуется в конце линии включать дополнительное сопротивление, величина которого на третьей гармонике равна волновому сопротивлению линии.

Однако моделирование показало, что подобный прием устраняет стоячие волны только на конечном участке линии. Перспективным направлением исследований является выбор способа устранения режима стоячих волн по всей длине линии, изучение влияния высших гармоник, кратных трем, а также учета и влияния нагрузки троллейбуса.

Список литературы

1. Канов Л.Н., Солодкий А.В., Пронин А.А. Повышение эффективности городского электротранспорта на основе использования энергии рекуперации. – Энергетические установки и технологии: научный журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2018. – Т.4. – С. 45-51.
2. Марков И.П. Линии передач. – М.: Изд-во МО СССР. – 1958. – 109 с.
3. Примеры анализа и расчетов режимов электропередач, имеющих автоматическое регулирование и управление / Н.Д.Анисимова, В.А.Веников, В.В.Ежков [и др.] / Под ред. В.А.Веникова. – М.: изд-во «Высшая школа», 1967. – 296 с.
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – М.: изд-во «Юрайт», 1 часть. – 2012. – 701 с.
5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 488 с.
6. Иоссель Ю.Я., Кочанов Э.С., Струнский М.Г. Расчет электрической емкости. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 288 с.

References

1. Kanov L.N., Solodkiy A.V., Pronin A.A. *Povyshenie effektivnosti gorodskogo elektrotransporta na osnove ispolzovaniya energii rekuperatsii* [Increase of efficiency of city electrotransport on the basis of the use of energy of recuperation]. Energetical plants and technologies: scientific journal. – Sevastopol: SevGU, V.4, 2018. – P. 45-51.
2. Markov I.P. *Linii peredach* [Transmissions Lines]. Moscow: Izd. MD USSR, 1958. – 109 p.
3. Anisimova N.D., Venikov V.A., Ezgkov V.V. *Primery analiza i raschetov rezgimovelektroperedach, imeyushchih avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie* [Examples of analysis and calculations of the modes of electricity transmissions, having automatic control and management]. Moscow: Izd. “Higher school”, 1967. – 296 p.
4. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Elektricheskie tsepi* [Theoretical bases of the electrical engineering. Electric circuits]. Moscow: Izd. “Yurait”, Path 1, 2012. – 701 p.
5. Kalantarov P.L., Tseitlin L.A. *Raschet induktivnostei* [Inductans calculations]. Leningrad: Izd. “Energoatomizdat”, 1986. – 488 p.
6. Iossel Yu.Ya., Kochanov E.S., Strunskei M.G. *Raschet elektricheskoi emkosti* [Calculation of electric capacity]. Leningrad: Izd. “Energoizdat”, 1981. – 288 p.

УДК 621.316.94

Использование активных фильтров для улучшения качества электроэнергии в системах электроснабжения

О.Н. Титаренко[1], Д.Р. Поляков[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
plotnykova198608@mail.ru[1], dimonys7@gmail.com[2]

Статья поступила 08.11.2019 г.; после доработки 12.11.2019 г.

Аннотация

На многих предприятиях используется большое количество регулируемых асинхронных электроприводов с полупроводниковыми преобразователями частоты малой и средней мощности. Их работа без использования средств повышения качества электроэнергии может привести к частым отказам систем защиты и автоматики, ускоренному электрическому старению изоляции трансформаторов и линий электроснабжения, повышенному износу электрооборудования. Гармоники также могут возникать при передаче электрической энергий по электрическим сетям из-за этого в сетях используют фильтры, улучшающие качество передачи электричества Для повышений качества электроэнергии наиболее рациональным решением повышения качества электроэнергии, является использование активных фильтров.

Ключевые слова: Активные фильтры, качество электроэнергии, гармоники, искажения, предприятиях, составляющие тока.

Use of active filters to improve the quality of electric energy in power supply systems

O.N. Titarenko[1], D.R. Polyakov[2]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
plotnykova198608@mail.ru[1], dimonys7@gmail.com[2].

Received 08.11.2019 г.; received in final form 12.11.2019 y.

Abstract

Many enterprises use a large number of adjustable asynchronous electric drives with semiconductor frequency converters of small and medium power. Their work without the use of means to improve the quality of electricity can lead to frequent failures of protection systems and automation, accelerated electrical aging of the insulation of transformers and power lines, and increased wear of electrical equipment. Harmonics can also occur when electric energy is transmitted through electric networks, because of this, filters that improve the quality of electricity transmission are used in networks. To improve the quality of electricity, the most rational solution to improve the quality of electricity is to use active filters.

Keywords: Active filters, power quality, harmonics, distortions, current components

Введение

В наше время высоких технологий всё более распространёнными становятся нелинейные нагрузки (частотные преобразователи, инверторы, системы бесперебойного питания, импульсные источники питания, люминесцентные и светодиодные лампы и т.п.). Из-за таких изменений в структуре нагрузки основной темой в этом десятилетии стали качество электроэнергии и снижение уровня гармоник.

Проблемы, вызываемые гармониками, такие как перегрев трансформаторов и вращающихся

машин, перегрузка проводников нейтрали, выход из строя конденсаторных батарей и т.п., приводят к повышению эксплуатационных расходов и также могут привести к снижению качества продукции и производительности труда.

Кроме того, изменения в структуре генерации электроэнергии в сторону использования энергии ветра и солнечных батарей, которые тоже генерируют гармоники, также приводят к тому, что применение фильтров гармоник становится всё более важным для обеспечения стабильного энергоснабжения с приемлемым качеством электроэнергии.

Активные фильтры защищает электроустановки и технику от различных гармоник. Проходящие по сети гармоники ухудшают качество электроэнергии и являются причиной многочисленных отрицательных эффектов:

- перегрузка, вибрация и старение генераторов, трансформаторов, двигателей;
- перегрузка и старение косинусных конденсаторов, компенсирующих реактивную мощность;
- искажение напряжения питания, что может создать помехи для чувствительных потребителей;
- перегрузка нулевых рабочих проводников из-за суммирования гармоник 3-го порядка, создаваемых однофазными нагрузками;
- возмущения в сетях передачи данных и телефонных линиях;
- резонансные явления на частотах высших гармоник.

Все перечисленные отрицательные эффекты, в конечном счете, приводят к следующим негативным результатам:

- преждевременное старение оборудования приводит к снижению его срока службы и необходимости его более ранней замены;
- перегрузки в сети вынуждают увеличивать заявленную мощность и приводят к дополнительным потерям или же к необходимости завышения параметров установки (нерациональное использование мощностей);
- гармонические искажения тока вызывают ложные срабатывания устройств релейной защиты и остановку производственного оборудования.

Сравнение активных с пассивными фильтрами

Пассивные фильтры (Рис. 1) имеют в своем составе только пассивные элементы такие, как резисторы, индуктивности, конденсаторы.

Данный тип фильтров не требует источника питания для функционирования и не усиливает мощность выходного сигнала (в отличие от активного фильтра) [1].

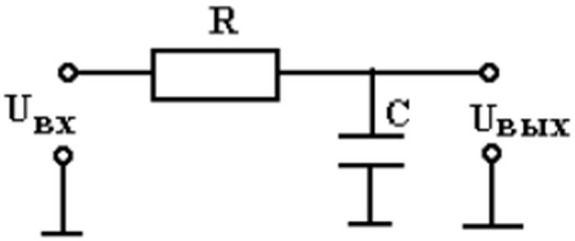


Рис. 1 Схема пассивного фильтра нижних частот.

В активном фильтре (Рис. 2) используется один или несколько активных компонентов: транзистор или операционный усилитель.

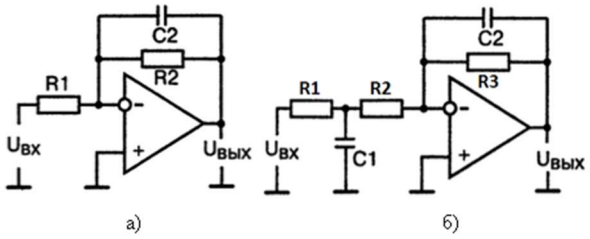


Рис. 2 Схемы активного фильтра нижних частот на операционном усилителе: а) первого б) второго порядка.

Самый важный недостаток пассивных фильтров их работа на определение гармоники, если в сети возникнет гармоник не входящий в диапазоне фильтра он не сможет ослабить искажения гармоника.

У активных фильтров нет такой проблемы так в нем есть активные элементы. Так же у активных фильтров есть и другие преимущества по сравнению с пассивным, а именно:

- способность усиливать сигнал, лежащий в полосе их пропускания;
- отсутствие индуктивностей, имеющих большие габариты;
- легкость настройки;
- малые масса и объем;
- простота каскадного включения при построении фильтров высокого порядка.

Принципы активной фильтрации

Активный фильтр представляет собой электронное устройство, которое в ответ на появление в сети гармонических искажений, генерирует соответствующий компенсационный ток,

находящийся в противофазе с током, протекающим в сети. Тем самым результирующая форма тока в сети остается максимально приближенной к синусоидальной форме [3].

Силовая часть активного выпрямителя представляет собой трехфазный мост, собранный на основе высокочастотных полностью управляемых транзисторов, который может включаться как параллельно, так и последовательно. Также, использование активных фильтров может сочетаться с применением пассивных фильтров. Такие фильтры называются гибридными.

На рис. 3 показана схема параллельного включения активного фильтра, на рис. 4 - схема последовательного включения активного фильтра, на рис. 5 - схема гибридного активного фильтра [3].

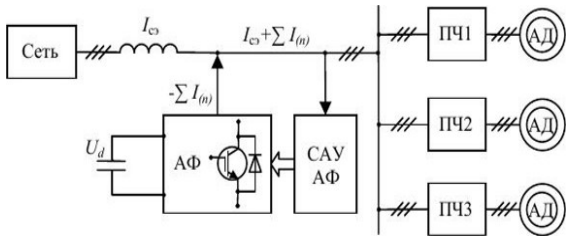


Рис. 3 Схема активного фильтра параллельного включения.

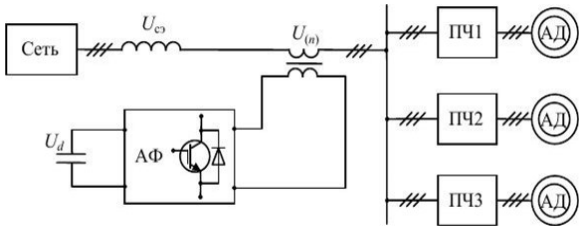


Рис. 4 Схема активного фильтра последовательного включения.

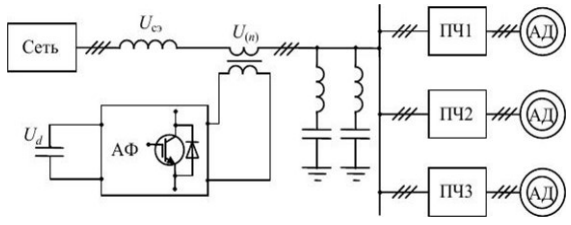


Рис. 5 Схема гибридного активного фильтра.

В активных фильтрах параллельного включения используется трехфазный полностью управляемый коммутатор, который работает в инверторном режиме.

Система автоматического управления активного фильтра (САУ АФ) осуществляет расчет коммутационной функции фильтра и формирует управляющие сигналы для транзисторов коммутатора. В результате коммутации активного фильтра, в сеть электроснабжения генерируются высокочастотные гармонические составляющие тока, такие же, какие генерируются преобразователями частоты электроприводов, но с противоположным знаком.

Эти гармоники, накладываясь друг на друга, компенсируются. В результате, в сети электроснабжения протекают синусоидальные токи и напряжения. При параллельном включении активного фильтра, силовой коммутатор подключается через трансформатор, образуя независимый источник электроэнергии. Система автоматического управления обеспечивает регулирование амплитуды и фазы напряжения генерируемого в сеть электроснабжения. Силовой коммутатор активного фильтра функционирует в широтно-импульсном режиме. Активные фильтры, такой схемы включения, позволяют снизить амплитуды высших гармоник напряжения, поддерживать амплитуду напряжения и уменьшить колебания и провалы напряжения [2].

Активные фильтры гармоник серии PQSineTM имеют модульную систему построения и предназначены для 3-фазных сетей как с нейтралью, так и без нейтрали с напряжениями от 200 В до 480 В переменного тока и с частотами 50/60 Гц. Эти активные фильтры гармоник в состоянии анализировать и нейтрализовать гармоники вплоть до 50-го порядка. В серии активных фильтров EPCOS PQSineTM максимальный номинальный ток достигает 600 А с шагом 60 А в зависимости от варианта построения [2].

Цифровая часть PQSine активного фильтра подавления гармоник представляет собой 32-разрядный цифровой сигнальный процессор. Обладая временем реакции всего 21 мкс, активный фильтр PQSine является одним из лучших в своем классе. Разработанный для PQSine фильтров новый алгоритм обработки («selective drive control (SDC)») превосходит по скорости обычные алгоритмы, основанные на быстром преобразовании Фурье.

В отличие от классической коррекции коэффициента мощности, при котором корректируются только индуктивные нагрузки, PQSine фильтры также компенсируют емкостную реактивную нагрузку. В дополнение к фильтрации PQSine активные фильтры гармоник обеспечивают баланс нагрузок по каждой фазе. Версии фильтров для 3-фазных сетей с нейтралью дополнительно могут корректировать токи нейтрали. 7-дюймовый или 12,1-дюймовый

цветной сенсорный экран представляет собой удобный интерфейс для настройки параметров и мониторинга работы системы [2].

Синтез активных фильтров

Существует несколько различных типов активных фильтров, некоторые из которых также имеют и пассивную форму:

- фильтр высоких частот — ослабляет (обычно значительно) амплитуды гармонических составляющих сигнала выше частоты среза;
- фильтр низких частот — ослабляет (обычно значительно) амплитуды гармонических составляющих сигнала ниже частоты среза;
- полосовой фильтр — ослабляет (обычно значительно) амплитуды гармонических составляющих сигнала выше и ниже некоторой полосы;
- режекторный фильтр — ослабляет (обычно значительно) амплитуды гармонических составляющих сигнала в определённой ограниченной полосе частот.

Все 4 типа фильтров определяются своей диаграммой Боде — передаточной характеристикой в частотной области (совокупностью АЧХ и ФЧХ). Фазовые фильтры (Delay) характеризуются временем задержки или фаза-частотной характеристикой.

Возможны следующие способы реализации активных фильтров:

- виде фильтра Баттерворта;
- виде фильтра Чебышева;
- виде фильтра Бесселя;
- виде эллиптического фильтра;
- виде инверсного фильтра Чебышева.

Фильтр Баттерворта проектируется так, чтобы его амплитудно-частотная характеристика была максимально гладкой на частотах полосы пропускания.

Отличительной особенностью фильтр Чебышева является более крутой спад амплитудно-частотной характеристики и существенные пульсации амплитудно-частотной характеристики на частотах полос пропускания.

Характерной особенностью фильтр Бесселя является максимально гладкая групповая задержка.

Отличительной особенностью эллиптический фильтр которого являются пульсации амплитудно-частотной характеристики как в полосе пропускания, так и полосе подавления.

Характерной особенностью инверсний фильтр Чебышева это монотонная амплитудно-частотная характеристика в полосе пропускания и содержит пульсацию в полосе задерживания.

Для каждого конкретного выбранного типа фильтра (ФНЧ, ФВЧ, полосового, режекторного, фазового) возможны не все виды реализаций. Например, для построения фазовых фильтров, можно использовать только фильтр Бесселя [1].

Применение активных фильтров

Активные фильтры применяются в различных сферах:

- железнодорожный транспорт;
- нефтяная, газовая и добывающая промышленность;
- металлургическая промышленность;
- химическая промышленность;
- электрические сварочные системы;
- системы бесперебойного питания;
- центры обработки и хранения данных;
- офисные здания и торговые центр (подавление 3-ей гармоники и разгрузка нейтрали).

В зависимости от требований, предлагает системы активной фильтрации с различными вариантами монтажа:

- Система активных фильтров для монтажа на пол, в виде промышленного шкафа.
- Система активных фильтров для монтажа на стену, в виде настенной панели.
- Модуль активного фильтра.

Заключение

Снизить уровень гармоник можно с использованием активных фильтров (генерирующих гармоники в противофазе к гармоникам искажений и за счёт этого их уничтожающих).

Хотя основные принципы работы активных фильтров были разработаны достаточно давно, они стали привлекать к себе повышенное внимание в последние несколько лет, потому что появилась возможность использования биполярных транзисторов с изолированным затвором (IGBT) и цифровых сигнальных процессоров (ЦСП).

Сейчас активные фильтры являются эффективным способом в борьбе с гармониками и обеспечивают:

- фильтрация гармоник тока вплоть до 50-го порядка;
- динамическая компенсация реактивной мощности;
- балансировка нагрузки по всем фазам;
- компенсация фликера;

- эффективность фильтрации более 97 %;
- модульная система построения фильтров допускает расширение от 60 А до 600 А;
- защита от перегрузки.

Список литературы

1. Марченко А.Л. Частотные фильтры: пассивные, активные и цифровые – 2017. – 166 с.
2. Лутц фон Вангенхайм Активные фильтры и генераторы. Проектирование и схемотехника с использованием интегрированных микросхем – 2010. – 416 с.
3. В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев Электроника. М: Высшая школа – 1991. – № 6.5. – С. 429 – 434.
4. Джонсон Д. и др. Справочник по активным фильтрам: Пер. с англ./ Д. Джонсон, Дж. Джонсон, Г. Мур. — М: Энергоатомиздат, 1983. — 128 с.
5. Хьюлсман Л. П., Аллен Ф. Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров: Пер. с англ. Москва, издательство: Радио и связь, 1984. - 384 с.

References

1. V. G. Gusev, Yu. M. Gusev Electronics. M: Higher school - 1991. - No. 6.5. - S. 429 - 434.
2. Lutz von Wangenheim Active filters and generators. Design and circuitry using integrated circuits - 2010. - 416 p.
3. Marchenko A.L. Frequency filters: passive, active and digital - 2017. - 166 p.
4. Johnson D. et al. Handbook of Active Filters: Per. with English / D. Johnson, J. Johnson, G. Moore. - M: Energoatomizdat, 1983. - 128 p.
5. Hjulsman L. P., Allen F. E. Introduction to the theory and calculation of active filters: Per. from English Moscow, publishing house: Radio and communications, 1984. - 384 p.

УДК. 621.311:658

Актуальность применения элегазовых выключателей на современном этапе развития электроэнергетики

Н.А. Яковенко[1], В.В. Смирнов[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.
[1]nik777fort@yandex.ru, [2]svadick@mail.ru

Статья поступила 06.11.2019 г.; после доработки 12.11.2019 г

Аннотация
В статье рассматриваются элегазовые выключатели, их преимущества и недостатки, перспективы модернизации и применения на текущем этапе развития электроэнергетики

Ключевые слова: элегазовые выключатели, коммутационные аппараты, современная электроэнергетика.

Relevance of gas-insulated switches at the current stage of electric power industry development

N.A. Iakovenko [1], V.V. Smirnov [2]
FAEI HE «Sevastopol State University», 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia.
[1]nik777fort@yandex.ru, [2]svadick@mail.ru

Received 06.11.2019 y.; received in final form 12.11.2019 y.

Abstract
The article considers gas-insulated switches, their advantages and disadvantages, prospects of modernization and application at the current stage of electric power industry development.

Key words: gas-insulated switch, switchgear equipment, modern electric power industry.

Введение

Уникальные свойства электротехнического газа были открыты в России в 30-х годах XX века ученым Ленинградского физико-технического института Гохбергом Б.М., который при исследовании электрических свойств отдельных газов обратил внимание на особые свойства шестифтористой серы SF6.

На основе проведенных опытов, ученым было высказано предположение о возможностях применения элегаза в качестве изоляционной среды для электрооборудования высокого напряжения [1].

Первые патенты на использование элегаза, как прерывающей среды, были зарегистрированы в 1938 году Виталием Гроссе (AEG) и независимо от него позже в США, в июне 1951 года, Лингалом, Броуном и Штормом (компания «Вестингауз») [2]. С 1976 года в РСФСР началось широкое использование выключателей с элегазовой изоляцией, и по мере технического прогресса с 90-х годов прошлого столетия, в Москве начали внедрять в эксплуатацию элегазовые выключатели в современном понимании этого словосочетания.

В то время это был один из самых перспективных и быстроразвивающихся проектов, наряду с вакуумными выключателями. В связи с отличными дугогасящими свойствами элегаза и вакуума, минимизацией рисков возникновения взрыва и чувствительности к воздействию внеш-

ней среды. Они равноправно занимают лидирующие позиции среди выключателей класса напряжения от 6 до 750 кВ, и относятся к наиболее современным и надёжным средствам высоковольтного оборудования [4].

Целью исследования является изучение преимуществ и недостатков элегазовых выключателей, и возможные пути их модернизации на современном этапе развития электроэнергетики.

Результаты исследования

Отличительные особенности элегазовых выключателей продиктованы их особым газом – шестифтористая сера SF_6 (шестифтором) с чрезвычайно инертным соединением. Благодаря чему элегаз используется в качестве изоляционного материала и дугогасительной среды, достигается высокая сопротивляемость воздействиям электрического тока, в связи с высокими свойствами электрической прочности.

Поток деионизированного элегаза между контактами восстанавливает диэлектрическую прочность промежутка, препятствуя повторному зажиганию дуги [3]. Необходимость дутья определяет сложность управляющего механизма и его стоимость. Новые разработки в сфере гашения электрической дуги в элегазе направлены на сокращение или ликвидацию этого дополнительного фактора стоимости.

Однако, здесь же кроится их существенный недостаток, на 3-й Сессии Конференции Участников ООН Рамочной Конвекции о климатических изменениях было постановлено, что элегаз является одним из опасных нагретых газов на планете.

Из-за обладания стабильным молекулярным составом, он не разрушим уже в течении 3200 лет и его потенциал глобального потепления оценивают в 24900 у.е., для сравнения углекислый газ оценивается в 1 у.е. В связи с этим, элегазовые выключатели не являются экологически чистыми, и их утилизация требует выделения дополнительных средств.

Кроме того, элегазовая дугогасительная камера, состоит из изолирующих синтетических частей и резиновых прокладок, в силу наличия которых вероятность взрыво- и пожароопасности при повреждении коммутационного аппарата очень велика. Но в связи с тем, что технически исправный и периодически обслуживающийся элегазовый выключатель имеет малый процент утечек элегаза, можно считать, что такой выключатель вреда окружающей среде не наносит. Исключение составляют случаи, когда по причине повреждения бака выключателя элегаз полностью выходит из бака в атмосферу [6].

Ещё один минус связанный с химическим свойством газа состоит в том, что элегаз теряет свои изоляционные свойства и переходит в жидкое состояние при эксплуатации в условиях низкой температуры окружающей среды, в связи с чем, в отношении температурного режима элегазовых электроустановок предъявляют дополнительные требования.

Во избежание этого негативного фактора, в электроустановках возможно использование специальной системы подогрева, которая существенно повышает надёжность элегазового электрооборудования при эксплуатации в условиях отрицательных температур (-40° и ниже). Кроме этого можно использовать автокомпрессионный принцип.

Суть принципа состоит в применении перепада давления, которое создаёт дополнительное компрессионное устройство в дугогасительной камере. Это позволяет использовать выключатель до 40 градусов по Цельсию ниже нуля.

Вакуумный же выключатель может эксплуатироваться в диапазоне изменения температур от +50 до -60°С, без дополнительных устройств и установки датчика контроля состояния вакуума [4].

Также к недостаткам элегазовых выключателей можно отнести то, что они имеют более сложное производство, которое подразумевает:

– необходимость соблюдения высокой чистоты и точности;
– необходимое наличие специальных устройств, выполняющих наполнение, перекачку и очистку элегаза;
– относительно высокая стоимость элегазовой смеси;
– требования для более внимательного отношения по использованию и учету элегаза.

Кроме того, ПАО «Россети» и другие крупные энергетические компании России нацелены на применение оборудования и материалов, обеспечивающих снижение отрицательного влияния на окружающую среду в процессе эксплуатации.

Это следует из «Программы инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016-2020 гг. с перспективой до 2025 г.»: «Применение оборудования и материалов, обеспечивающих снижение отрицательного влияния на окружающую среду в процессе эксплуатации («сухие» трансформаторы, трансформаторы с экологически безопасными диэлектрическими жидкостями, вакуумные выключатели, измерительные

трансформаторы и КРУ с азотом в качестве диэлектрика, технологии, снижающие воздействие электромагнитных полей (ГИЛ)). Она нацелена, в том числе, на минимизацию затрат при утилизации такого оборудования по сравнению с традиционным (маслонаполненное, с трихродефинилом и т.д.)» [9]. В условиях распространения всеобщей тенденции на цифровизацию, в том числе и электроэнергетической отрасли (проект Минэнерго РФ - «Цифровая энергетика» [8] и ПАО «Россети» - «Концепция цифровой трансформации 2030» [7]), элегазовые выключатели в своих показателях уступают конкурентам – вакуумным выключателям. Поскольку при интеграции элегазовых выключателей в систему цифровой подстанции стоимость организации передачи информации о давлении элегаза сопоставима со стоимостью самого выключателя.

Несмотря на это, элегазовые выключатели на рынке коммутационного оборудования имеют высокий спрос благодаря своим существенным достоинствам, таким как:

1. Универсальность. Применяются для коммутации в сетях различных напряжений, распространённых в современной отечественной электроэнергетике. Возможность установки в электроустановках, как закрытого, так и открытого выполнения;
2. Компактность. Использование элегаза позволяет делать электрооборудование небольшой габаритной пропорции и веса;
3. Быстродействие. Гашение дуги осуществляется при малом числе разрывов и быстро;
4. Долголетие. Нет необходимости заменять газовые смеси. Контакты, что соприкасаются со смесями, почти не подлежат изнашиванию, а внешний корпус обладает большими показателями защиты;
5. Большой ресурс. Наличие большого коммутационного ресурса контактной системы элегазового выключателя;
6. Безопасность. Высокая взрыво- и пожаробезопасность, нечувствительны к воздействию окружающей среды – полностью запаянная герметичная камера;
7. Подходят для отключения переменного и постоянного тока высокого напряжения, в то время, как их аналоги – вакуумные модели не могут использоваться в сетях высокого и сверхвысокого напряжения [5].

На рынке коммутационного оборудования элегазовые выключатели конкурируют с вакуумными выключатели в сегменте среднего напряжения – от 66 кВ до 132 кВ, и низкого напряжения – 3,6 кВ до 36 кВ. Это обусловлено ценовой политикой и концепцией цифровой трансформации. Однако в условиях здоровой конкуренции, ведутся многочисленные исследования по разработке цифровых подстанции с применением элегазовых выключателей, и малогабаритных электрических выключателей на напряжение 10-55 кВ, которые способны выдвинуть их на лидирующие позиции по сравнению с вакуумными выключателями [1]. В сегменте коммутационного оборудования высокого напряжений – 220 кВ – 750 кВ, элегазовые выключатели являются бесспорным лидером из-за преимуществ в стоимости, небольших отчислениях на обслуживание, взрыво- и пожаробезопасности, износостойкости, массе и габаритах сооружения.

Вывод

Изменение требований к сети в связи с модернизацией электроэнергетической отрасли, накладывают дополнительные требования на производительность, надежность и устойчивость выключателей. Несмотря на свои недостатки, элегазовый выключатель является надёжным и эффективным коммутационным аппаратом, способный удовлетворить возрастающие требования к электрооборудованию. А преимущества диэлектрической среды элегазовых выключателей по сравнению с традиционными комутационными аппаратами способствуют повышению эффективности функционирования энергообъектов, снижению затрат на эксплуатацию распределительных сетей, электрических станций и подстанций.

Таким образом, на сегодняшний день, можно сделать вывод о том, что элегазовые выключатели ведут успешную конкуренцию с вакуумными и с воздушными выключателями, и имеют отличные перспективы использования в современных электрических установках.

Список литературы

1. Балобанов, Р.Н. Влияние времени эксплуатации элегазового оборудования на состояние изоляции [Электронный ресурс] / Балобанов Р.Н., Лопухова Т.В., Зацаринная Ю.Н. // Вестник Казанского технологического университета. - 2012 - №14.
2. Зацаринная, Ю.Н. Элегазовые выключатели в современной энергетике [Электронный ресурс] / Зацаринная Ю.Н, Нурмеев Т.А. // Вестник Казанского технологического университета. - 2014 - №19.
3. Хабдуллина З.К., Акылбек Б.Ж., Шкуренок В.А. [и др.] Сравнительный анализ высоковольтных

выключателей // Научные достижения биологии, химии, физики: сб. ст. по матер. XII междунар. науч.-практ. конф. – Новосибирск: СибАК, 2012.
4. Атамирзаев Т. У. Перспективы применения вакуумных и элегазовых выключателей 110-220 кВ в энергетической система / Т. У. Атамирзаев // Science time. – 2018. – № 7. – С. 29-32.
5. Электрические аппараты высокого напряжения / Под редакцией Г.Н. Александрова. Ленинград: Энергоатомиздат, 1989. 344 с.
6. Сравнительная характеристика масляных, вакуумных и элегазовых высоковольтных выключателей. - URL: http://electricalschool.info/elstipod/1722-sravnitelnaja-kharakteristika.html . Дата обращения: 23.11.2019.
7. Россети. Концепция цифровой трансформации 2030. - URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf . Дата обращения: 23.11.2019.
8. Минэнерго РФ. Цифровая трансформация электроэнергетики Российской Федерации. - URL: http://www.anspa.ru/linkpics/News/20190208_GOVTalks.pdf . Дата обращения: 23.11.2019.
9. Россети. Программа инновационного развития ПАО «Россети» на период 2016-2020 гг. с перспективой до 2025 г. - URL: https://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation__program.pdf . Дата обращения: 24.11.2019.

References

1. Balobanov, R.N. Influence of operation time of gas-insulated equipment on the state of insulation [Electronic resource]/Balobanov R.N., Lopukhova T.V., Zatsarinaya Yu.N.//Journal of Kazan Technological University. - 2012 - № 14.
2. Zatsarinaya, Y.N. Electrogas switches in modern energy [Electronic resource]/Zatsarinaya Yu.N, Nurmeyev T.A.//Journal of Kazan Technological University. - 2014 - № 19.
3. Habdullina Z.K., Akylbek B.J., Shkurenok V.A. [et al] Comparative analysis of high-voltage switches//Scientific achievements of biology, chemistry, physics: st. According to mater. XII international scientific - report. Cont. - Novosibirsk: SibAK, 2012.
4. Atamirzayev T. W. Prospects of using vacuum and gas-insulated switches 110-220 kV in the energy system/T. W. Atamirzayev//Science time. - 2018. - № 7. - P 29-32.
5. High voltage electric devices/Edited by G.N. Alexandrov. Leningrad: Energoatomizdat, 1989. 344 p.
6. Comparative characteristics of oil, vacuum and gas-insulated high-voltage switches. - URL: http://electricalschool.info/elstipod/1722-sravnitelnaja-kharakteristika.html. Date of appeal: 23.11.2019.
7. Rosseti. Digital Transformation Vision 2030. - URL: https://www.rosseti.ru/investment/Kontseptsiya_Tsifrovaya_transformatsiya_2030.pdf. Date of appeal: 23.11.2019.
8. Minenergy RF. Digital transformation of the power industry of the Russian Federation. - URL: http://www.anspa.ru/linkpics/News/20190208_GOVTalks.pdf. Date of appeal: 23.11.2019.
9. Rosseti. Program of innovative development of PJSC "Rosseti" for the period 2016-2020 with perspective till 2025 - URL: https://www.rosseti.ru/investment/policy_innovation_development/doc/innovation__program.pdf. Date of appeal: 24.11.2019.

ХИМИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 631.029

Расчетно-экспериментальное исследование композитных материалов для защиты от излучения

В.М. Гавриш[1], Н.И. Черкашина[2], Т.В.Чайка [3], В.А.Разина [4], Д.В.Тарасевич [5]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия. [2]selyanskij-as@ya.ru

Статья поступила 05.11.2019 г.; после доработки 08.11.2019 г.

Аннотация

Исследовано влияния различных концентраций нанопорошков тугоплавких и легкоплавких металлов на радиационно-защитные свойства композита. Выбран наиболее оптимальный модификатор композитного материала, улучшающий радиационно-защитные свойства – ТТК$_{отожженного}$, (кратность ослабления 29,8). Представлен физико-химический анализ некоторых порошков в составе радиационно-защитных материалов.

Ключевые слова: нанопорошок, композиционные материалы, кратность ослабления, карбид вольфрама карбид титана, экономический расчет.

Computational and experimental studies of composite materials for radiation protection

V.M. Gavrish, N.I. Cherkashina ,T.V.Chayka, , 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 05.11.2019 y.; received in final form 08.11.2019 y.

Abstract

The influence of different concentrations of nanopowders of refractory 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, tungsten carbide titanium carbide, economic calculation.

Введение

Для защиты от α- и β-излучения, в отличие от γ- и нейтронного излучения, не требуется больших толщин поглощающих экранов.

Глубина проникновения ионизирующего излучения зависит от вида энергии и природы излучения, а также от состава и плотности облучаемого вещества. Длина пробега электромагнитного излучения минимальна в плотных материалах, например в свинце. Поэтому в качестве эффективного защитного экрана от γ-излучения обычно используются свинец, тяжелые бетоны и т.д.

Быстрые нейтроны удобнее предварительно замедлить в результате упругого рассеяния на ядрах вещества с малым порядковым номером

(парафин, вода, углеводороды, пластмасса, резина), превратив их в тепловые, а затем поглотить ядрами бора, кадмия и другими материалами с большим сечением захвата.

Таким образом, защита от ионизирующего излучения с одной стороны основывается на замедлении быстрых нейтронов и поглощении тепловых нейтронов, а с другой стороны – на поглощении γ-квантов.

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, оксид титана, оксид тантала, вольфрам (ТТВ-титан, тантал, вольфрам), оксиды легкоплавких металлов, карбид вольфрама и кобальта, коррунд [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 Element Identification компании Phenom, позволяющий использовать электронный микроскоп Phenom ProX для анализа образцов методом энергодисперсионного спектроскопии.

Для анализа размера, форма и морфология частиц использовали программное обеспечение ParticleMetric, позволяющая анализировать изображения частиц.

Физико-химический анализ некоторых порошков представлен в таблице 1.

Примечание: примеси включают в себя B, Al, Si, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Mo, W, P, C, S и другие элементы.

Таблица 1.*Физико-химические свойства некоторых порошков*

Товарный знак	Средний диаметр/нм	Удельная площадь/($м^2$/г)	Объемная плотность, (г/$см^3$)	Примеси	Содержание, %
FCoN-20	<30	>25	0.04~5	<0.3	<0.1, O_2
FCuO-20	<30	>20	0.04~5	<0.3	<0.1, O_2
TiO_2	65 - 100	8-15	-	<0.3	Cl_2 <0,2%
Al_2O_3	40-120	12-20	-	<0.5	Fe_2O_3: не более 0,3%; SiO_2: не более 0,2%;

Постановка цели и задач научного исследовании

Целью данной работы является определить оптимальной концентрации добавки модифицированных порошков различных материалов.

Для решения поставленной задачи, объектом исследования выбраны защитные композитные материалы с процентной концентрацией 1 – 10 %; 2 – 15 % ; 3 – 20 % ; 4 – 25 % ; 5 –30 %].

Методика эксперимента

При проведении испытаний применялся дозиметр-радиометр МКГ-01, который предназначен для контроля основных характеристик непрерывного фотонного (рентгеновского и гамма) и бета излучений, профессиональный портативный универсальный и многофункциональный прибор с автономным и стационарным питанием.

Методика испытаний была предложена [6]. Кратность ослабления оценивалась как отношение мощности экспозиционной дозы на поверхности защиты (испытуемого образца) к мощности экспозиционной дозы после защиты [7]. Мощность дозы в геометрии «без защиты» регистрировалась на расстоянии (a1) от источника

гама-излучения равном толщине образца (рисунок 1).

В геометрии «за защитой» мощность дозы регистрировалась не вплотную к поверхности исследуемого образца на одной оси с источником гама-излучения (рисунок 1).

Таблица 2. *Технические характеристики МКГ-01*

Техническая характеристика	Параметр
Диапазон энергий фотонного (гамма и рентген), МэВ	0,015…3,0
Энергия регистрируемого бета излучения, МэВ	0,15 и выше
Диапазон измерения мощности амбиентного эквивалента дозы, мкЗв/ч	0,10…10 000
Диапазон измерения амбиентного эквивалента дозы, мкЗв	0,10…1000 000
Диапазон измерения плотности потока бета частиц, 1/сxсм²	0,1 … 200
Основная погрешность измерения МЭД, %	±15
Основная погрешность измерения плотности потока, %	±20
Межповерочный интервал	2 года
Габаритные размеры, мм	180x85x45
Масса прибора не более, г	450
Рабочие условия эксплуатации:	

Исходя из условия электронного равновесия (керма в воздухе) измеряемая дозиметром - радиометром МКГ-01 мощность эквивалентной дозы выражалась в мкЗв/ч [8].

Кратность ослабления определялась как отношение величины МЭД, измеренной в геометрии «без защиты», к величине МЭД, измеренной в геометрии «за защитой».

Для снижения систематической погрешности измерения проводились по 10 раз. Значения МЭД рассчитывались как среднее арифметическое. Среднеквадратическое отклонение оценки кратности ослабления для экспериментального способа не превышает 20%.

Для оценки влияния модифицирующей добавки на радиационно-защитные свойства предлагаемого материала было уделено внимание геометрии измерения (рис. 1).

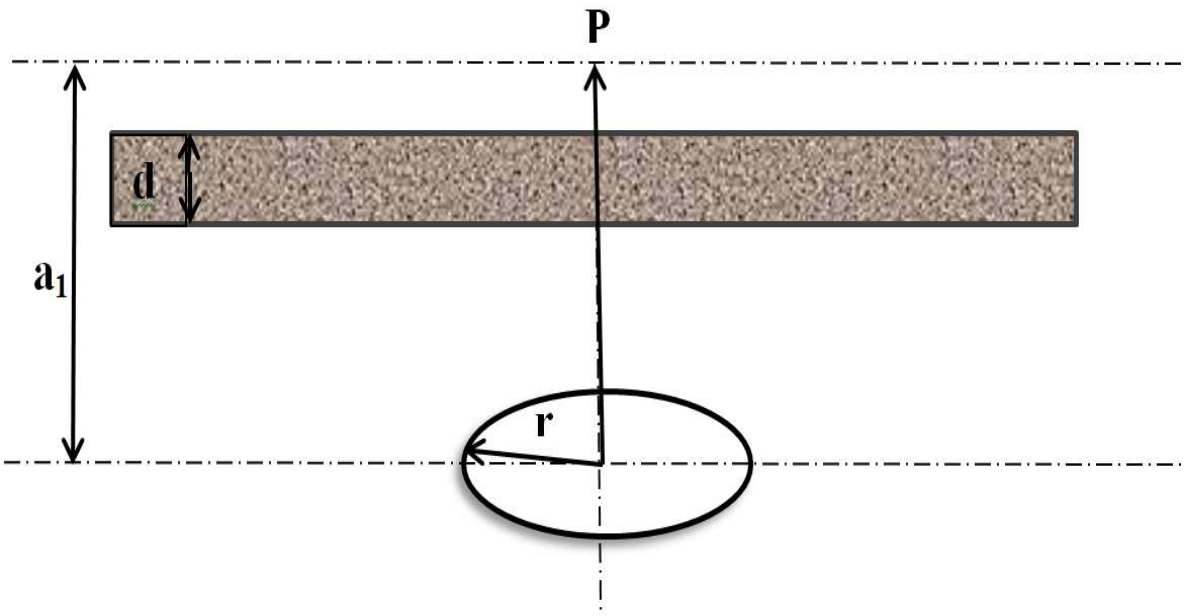


Рис.1. Геометрия для расчета дозы, где r – радиус препарата, P – точка измерения дозы, d – толщина радиационно-защитного материала, см; a_1 – расстояние от препарата до точки измерения дозы.

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.

Истинная скорость счета и итоговая скорость счета от препарата определялась по формулам 1 и 2 и измерялась на приборе КРК-1:

$$n_0=n_{изм}*P(\tau_p)-n_ф \quad (1)$$

где $n_{изм}$ – скорость счета от препарата без вычета фона, имп/мин; $n_ф$ – скорость счета фона, имп/мин; $P(t_p)$ – поправка не разрешающее время.

$$n_{итог}=n_0*e^{-0.693*\frac{d_{погл}}{\Delta\beta}} \quad (2)$$

где n_0 – истинная скорость счета от препарата, имп/мин; $d_{погл}$ – толщина слоя поглотителя, см; $\Delta\beta$ – слой половинного ослабления излучения в веществе, мг/см^3.

Относительная квадратичная ошибка:

$$\Delta=\frac{\sqrt{N}}{N}, \% \quad (3)$$

$$\Delta=\frac{\sqrt{935,625}}{935,625}=3,27, \%$$

Значение относительной квадратической погрешности для используемых радиометров находиться в допустимых пределах.

Кратность ослабления была получена путем расчета соотношения мощности дозы от препарата без слоя защитного материала к измеренной мощности дозы с защитным материалом.

Результаты исследования радиационно-защитных свойств композитных материалов модифицированных различными соединениями металлов представлены в таблице 3.

На рисунке 2 представлена диаграмма изменений скорости счета (имп/с) образцов от материала наполнителя.

Таблица 3. *Зависимость коэффициента ослабления от % концентрации добавки модифицированных порошков различных материалов*

Материал наполнителя защиты	Содержание, %	n, имп/с	Кратность ослабления	Материал наполнителя защиты	Содержание, %	n, имп/с	Кратность ослабления
CuO	10	5,45	8,02	WC	10	4,87	8,76
	15	4,98	9,1		15	4,46	9,15
	20	4,43	9,94		20	3,89	11,51
	25	3,51	12,8		25	3,11	15,98
	30	3,02	19,44		30	2,52	29,46
TiC	10	5,08	7,83	ТТК	10	4,27	12,44
	15	4,16	12,74		15	3,82	9,94
	20	3,11	16,85		20	3,59	12,32
	25	2,87	21,9		25	3,02	14,74
	30	2,18	28,34		30	2,55	22,09
Al_2O_3	10	5,4	7,23	ТТК(отож)	10	4,06	13,06
	15	4,82	8,4		15	3,68	12,08
	20	3,55	11,31		20	3,11	20,05
FeO	15	5,74	6,96		25	2,55	18,96
Корунд	10	2,86	15,91		30	2,2	29,86
	15	2,7	16,52	Корунд	25	2,43	21,17
	20	2,51	18,04		30	1,83	24,64

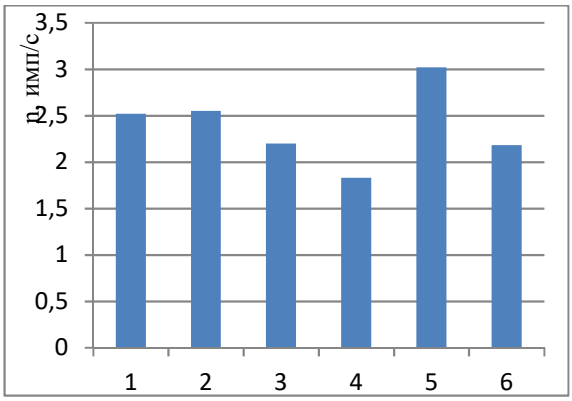


Рис.2. Изменения истинной скорости счета с использованием композитных образцов модифицированных различным нанопорошком концентрацией 20%

На рисунке 3 представлена диаграмма изменений коэффициента ослабления от материала наполнителя (нанопорошки).

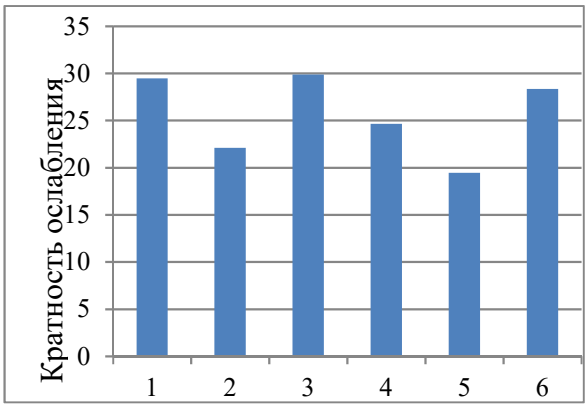


Рис.3. Изменений коэффициента ослабления композитных образцов модифицированных различным нанопорошком концентрацией 20%

Выводы

Таким образом, в результате исследования влияния наномодификаторов на радиационно-защитные свойства образцов, можно сделать следующие выводы:

- наиболее оптимальным модификатором композитного материала, улучшающий радиацииооно-защитные свойства является нанопрошок ТТКотож, (кратность ослабления 29,8), при добавлении которого наблюдаются наилучшие результаты (при концентрации 20% нанопрошка наблюдается увеличение радиацииооно-защитных характеристик в 23,3 раза);
- дальнейшее увеличение концентрации наномодификаторов во всех образцах приводило к снижению коэффициента ослабления за счет эффекта отражения и возникновения ложных импульсов;
- нанопрошок карбида вольфрама показал наименьшую радиационно-защитную способность по сравнении с другими тугоплавкими образцами;
- нанопрошоки оксида меди и железа показали наименьшую радиационно-защитную способность по сравнении с другими легкоплавкими образцами;
- 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 радиационной 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. Yastre-binskii, 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 радіаційна безпека. 2009, т.12, №4, с. 33-35.
6. Протокол испытаний по оценке кратности ослабления гамма-излучения образцами магнезиально баритовой штукатурки (АЛЬФАПОЛ ШТ-БАРИТ) г. Санкт-Петербург, 2007 г.
7. "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)". Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. 2009. - 87 с.
8. Голубев В.П. Дозиметрия и защита от ионизирующих излучений. Учебник для вузов. Под ред.

Е.Л.Столяровой. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 464 с.
9. Гавриш В.М. Анализ влияния наномодификатора порошка вольфрама на высокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 и клей эпоксидный ТУ 2252-003-62517430-01 / В.М. Гавриш, А.А. Бурьянская, Г.А.Баранов, О.П. Гавриш //Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности сборник статей по материалам научно-практической конференции. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». –2016. –С. 189–194.
10. 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 vyshe uchebnykh zavedenii. 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. Yastre-binskii, 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. Test report on the assessment of gamma-ray attenuation multiplicity by samples of magnetically barite plaster (ALFAPOLITE-BARITE) St. Petersburg, 2007
7. "Radiation safety standards (RSS-99/2009)". Sanitary rules and regulations SanPiN 2.6.1.2523-09. 2009. - 87 p.
8. Golubev V. P. Dosimetry and protection from ionizing radiation. Textbook for universities. Edited by E. L. Stolyarova. 4th ed. pererab. and additional M.: Energoatomizdat, 1986. 464 P.
9. Gavrish V.M. Analysis of the effect of nanomodifier of tungsten powder on high molecular weight polyethylene of the brand GUR 4122 and epoxy adhesive TC 2252-003-62517430-01 / V.M. Gavrish, A.A. Buryanskaya, G.A. Baranov, O.P. Gavrish // Actual issues of nuclear chemical technologies and environmental safety collection of articles on the materials of the scientific and practical conference. Sevastopol State University. –2016. – P. 189–194.
10. 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 6340.813.14

Оценка эффективности очистки сточных вод от вредных примесей сорбентами на основе лигнина и выбор технологической схемы очистки

В.А. Ерофеев[1], Н.И. Черкашина[2]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33, г. Севастополь, 299053, Россия.[1]*vaerofeev@mail.ru*,[2]*selyanskij-as@ya.ru*

Статья поступила 30.10.2019 г.; после доработки 01.11.2019 г.

Аннотация

Рассмотрены факторы определяющие эффективность очистки сточных вод от вредных примесей сорбентами на основе лигнина. Даны рекомендации по выбору технологической схемы очистки сточных вод в соответствии с факторами эффективности и требованиям по экологической безопасности.

Ключевые слова: экологическая безопасность, эффективность очистки, статическая и динамическая обменная емкость, соотношение массы сорбента и объему очищаемой среды, технологические параметры очистки, экологическая целесообразность выбранного метода очистки.

Evaluation of the efficiency of wastewater treatment from harmful impurities by sorbents based on lignin and the choice of technological scheme

V.A. Erofeev[1], N.I. Cherkashina[2]
Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia
[1]*vaerofeev@mail.ru*,[2]*selyanskij-as@ya.ru*

Received 30.10.2019 y.; received in final form 01.11.2019 y.

Abstract

The factors determining the effectiveness of wastewater treatment from harmful impurities by sorbents based on lignin are considered. Recommendations are given on choosing a technological scheme for wastewater treatment in accordance with efficiency factors and environmental safety requirements.

Keywords: environmental safety, cleaning efficiency, static and dynamic exchange capacity, the ratio of the mass of the sorbent and the volume of the medium to be cleaned, technological parameters of cleaning, environmental feasibility of the selected cleaning method.

Введение

Решение экологических проблем безопасного обращения с промышленными отходами и вредными выбросами, является основой безопасной для окружающей среды, эксплуатации промышленных предприятий и их дальнейшего развития. Одним из главных направлений федеральных целевых программ по обращению с промышленными отходами, является внедрение в технологический процесс высокоэффективных и безреагентных технологии, которые способствуют решению проблем, экобезопасности.

В настоящее время такими технологиями являются процессы связанные с использованием органических и неорганических ионообменных и сорбционных материалов [1].

Проблема очистки сточных вод связанна с большими объемами сред, не однородностью со-

става многокомпонентной системы, которая конечным образом влияет на эффективное использование существующих технологий очистки.

Как правило, в состав промышленных отходов, в зависимости от вида производства, входят соединения тяжелых металлов и другие токсичные органические и неорганические компоненты, которые создают проблемы низкой эффективности использования существующих технологий очистки и характеризуются кроме того высокая стоимостью очистки.

Решить эту проблему можно при использовании достаточно дешевых и универсальных технологий, в составе которых используется новые фильтрующие материалы на основе лигнина [2]. Использование лигниновых сорбентов в очистных системах имеет ряд преимуществ перед известными промышленными сорбционными материалами [3].

Лигнинсодержащие сорбенты изготавливаются из крупнотоннажных отходов гидролизных и сельскохозяйственных производств. В состав отходов входят :

- лигнин гидролизный;
- отходы после механической обработки древесины (древесная мука) ;
- хлопковая шелуха;
- подсолнечная, рисовая, овсяная лузга;
- пшеничные и ржаные отруби;
- мякина, солома пшеницы и других злаков;
- плодовые косточки;
- верхний перекарп грецкого ореха;
- стержни кукурузных початков (кукурузная кочерыжка) ;
- скорлупа кедрового ореха, арахиса и т.п.
- другие пеннтоза- и лигниносодержащие отходы растительного происхождения.

Сорбенты, полученные из лигнинсодержащего сырья (отходов), являются достаточно дешевыми, с высокими физико-химическими свойствами: относительно высокая ионообменная и сорбционная емкость; универсальность по отношению очистки от вредных примесей; низкая стоимость и не сложная технология утилизации отработанных сорбентов (прессование, сжигание и т.п.).

Ежегодно возобновляемая сырьевая база дает возможность организовывать крупнотоннажное производство и удовлетворять потребности в фильтрующих материалах промышленных предприятий, осуществляющих очистку сбросовых и промышленных стоков.

Постановка цели и задач научного исследовании

Целью настоящей работы является исследование эффективности очистки сточных вод от вредных примесей лигниновыми сорбентами, в зависимости от параметров процесса очистки, на основании которых выбирается модификация сорбента и оптимальная схема технологического процесса очистки.

Порядок и параметры эксперимента

Объектом исследования выбраны обработанные механо-химическими методами подсолнечная и рисовая лузга, солома пшеницы и верхний перекарп грецкого ореха, по технологии [2] режим opt несколько модификаций.

Для экспериментов брали две модификации сорбента: «фолиокс»-хромо-калиевый и фолиокс-сак-0,1 [2].

Технологические параметры процесса очистки сточных вод определяли по фосфат-ионам (PO_4^{3-}), хлорид ионам (Cl^-), сульфат ионам (SO_4^{2-}), ионам аммония (NH_4^+), ионам никеля (Ni^{2+}) и ионам меди (Cu^{2+}) в статических и динамических условиях с использованием атомно-адсорбционного спектрометра (ААС) «Сатурн-4ЭПАВ» с электрическим и плазменным анализатором. Результаты обрабатывали на ПК «AnLab».

Физико-химические величины и функциональный состав модификаций сорбента в «фолиокс»- хломо-калиевый фолиокс САК-0,1 приведены в таблице 1,2 [3].

Таблица 1 Функциональный состав модификаций сорбента «фолиокс-САК-0,1» и фолиокс хромо-калиевый

Таблица 1. *Функциональный состав модификаций сорбента «фолиокс-САК-0,1» и фолиокс хромо-калиевый*

Функциональные группы	Количество, мг-экв/г	
	«фолиокс» САК-0,1	«фолиокс» хромо-калиевый
Группы (-СООН; ОН-фенольные;	15,05	5,78
Карбонилы С=О	1,58	1,18
Спиртовые гидроксилы –ОН	4,05	4,55
Связанные азот	3,99	2,1

Таблица 2. *Физико-химические величины «фолиокс-САК-0,1» и фолиокс хромо-калиевый*

	Физико-химические величины		
Сорбент	Насыпная масса ГОСТ 10898,2-7 ($г/см^3$)	Удельный объем ГОСТ 10898.5-84 ($см^3/г$)	Удельная поверхность ГОСТ 19898.5.84 ($м^3/г$)
«фолиокс-САК-0,1»	0,606	1,648	310
фолиокс хромо-калиевый	0,758	1,319	325

Лабораторные исследования проводили в 2 этапа: 1 этап – статические условия процесса, время установления равновесия в статических условиях, для расчета статической обменной емкости эффективности очистки; 2 этап – динамические условия процесса (скорость установления процесса в динамических условиях до проскоковых концентраций ПДК), с целью определения оптимальных технологических параметров процесс очистки (скорость фильтрации, соотношение объема сорбента и очищаемой среды, время контакта сорбента с раствором).

На первом этапе исследования проводили на сорбенте Фолиокс-САК-0,1 таблица 1,4,5,6,7,8,13,14,15.

Условия проведения и параметры процесса приведены в таблице 3:

а) Очистка воды от фосфат ионов (PO_4^{3-}) в статических условиях. ПДК фосфат-ионов в сточных водах промышленных предприятиях 3,5 $мг/дм^3$ масса навески сорбента m_c 7,598 г. Объем очищаемого раствора V_p=150 мл. Отношение $\frac{m_c}{V_p}$=0,05.

Таблица 3. *Сорбент «фолиокс» (САК-01)*

$C_{исх}$=21,7 $мг/дм^3$	Время контакта сорбента с раствором							
Концентрация фосфатов в растворе С ($мг/дм^3$)	30 мин	1 час	1,5 часа	2 часа	2,5часа	3 часа	3,5 часа	Концентрация снижается в 1,25 раза
	17,7	17,3	17,3	17,8	17,5	17,0	16,9	

б) Очистка воды от хлорид-ионов (Cl^-) в статических условиях. ПДК хлорид-ионов в сточных водах промышленных предприятиях 100 $мг/дм^3$ масса навески сорбента m_c 7,598 г. Объем очищаемого раствора V_p=150 мл. Отношение $\frac{m_c}{V_p}$=0,05.

Таблица 4. *Сорбент «фолиокс» (САК-0,1)*

$C_{исх}$=177,3 $мг/дм^3$	Время контакта сорбента с раствором							
Концентрация хлорид ионов в растворе С ($мг/дм^3$)	30 мин	1 час	1,5 часа	2 часа	2,5часа	3 часа	3,5 часа	Концентрация снижается в 2,5-3,0 раза
	99,2	99,3	88,6	56,72	47,26	31,9	30,9	

в) Очистка воды от сульфат-ионов (SO_4^{2-}) в статических условиях. ПДК сульфат-ионов в сточных водах промышленных предприятиях 100 $мг/дм^3$ масса навески сорбента m_c 7,598 г. Объем очищаемого раствора V_p=150 мл. Отношение $\frac{m_c}{V_p}$=0,05.

Таблица 5. *Сорбент «фолиокс» (САК-0,1)*

$C_{исх}$=540 $мг/дм^3$	Время контакта сорбента с раствором							
Концентрация сульфатов в растворе С ($мг/дм^3$)	30 мин	1 час	1,5 часа	2 часа	2,5часа	3 часа	3,5 часа	Концентрация снижается в 1,5раза
	382	420	355	350	309	300	298	

г) Очистка воды от сульфат-ионов (SO_4^{2-}) в статических условиях. ПДК сульфат-ионов в сточных водах промышленных предприятиях 100 $мг/дм^3$ масса навески сорбента m_c 146 г.

Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл. Отношение $\frac{m_c}{V_р}$=0,3.

Таблица 6. *Сорбент «фолиокс» (САК-0,1)*

$С_{исх}$=547 мг/дм^3	Время контакта сорбента с раствором					
Концентрация сульфатов в растворе С (мг/дм^3)	30 мин	1 час	1,5 часа	2 часа	3 часа	Концентрация снижается на 100 %
	126	85	12	6	0	

д) Очистка воды от хлорид-ионов (Cl^-) в статических условиях. ПДК хлорид-ионов в сточных водах промышленных предприятиях 100 мг/дм^3 масса навески сорбента m_c 145 г. Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл. Отношение $\frac{m_c}{V_р}$=0,29.

Таблица 7. *Сорбент «фолиокс» (САК-0,1)*

$С_{исх}$=118,2 мг/дм^3	Время контакта сорбента с раствором							
Концентрация хлоридов в растворе С (мг/дм^3)	30 мин	1 час	1,5 часа	2 часа	2,5часа	3 часа	3,5 часа	Концентрация снижается в 10 раз
	117,8	80,5	70,9	35,4	17,02	14,18	11,8	

е) Очистка воды от фосфат ионов (PO_4^{3-}) в статических условиях. ПДК фосфат-ионов в сточных водах промышленных предприятий 3,5 мг/дм^3 масса навески сорбента m_c 146 г. Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл. Отношение $\frac{m_c}{V_р}$=0,3.

Таблица 8. *Сорбент «фолиокс» (САК-0,1)*

$С_{исх}$=25,7 мг/дм^3	Время контакта сорбента с раствором						
Концентрация фосфат-ионов в растворе С (мг/дм^3)	30 мин	1 час	1,5 часа	2 часа	2,5часа	3 часа	Концентрация снижается в 3 раза
	21,3	19,2	18,2	14,5	10,9	8,4	

ж) Очистка воды от фосфат ионов (PO_4^{3-}) в динамических условиях. ПДК фосфат-ионов в сточных водах промышленных предприятий 3,5 мг/дм^3 . Колоночный объем сорбента $V_к$=45,3 мл. Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл. Отношение $\frac{V_к}{V_р}$=0,09.

Таблица 9. *Сорбент «фолиокс» (хромо-калиевый)*

$С_{исх}$=18,8 мг/дм^3	Скорость фильтрации				
Концентрация фосфатов в растворе С (мг/дм^3)	25 мл/мин	10-15 мл/мин	3-5 мл/мин	1,2-2 мл/мин	Концентрация снижается в 3,5 раз
	10,8	9,5	5,2	4,9	

з) Очистка воды от ионов аммония (NH4+) в динамических условиях. ПДК ионов аммония в сточных водах промышленных предприятий 2,0 мг/дм3 . Колоночный объем сорбента Vк=45,3 мл. Объем очищаемого раствора Vр=500 мл. Отношение $\frac{V_к}{V_р}$=0,09.

Таблица 10. *Сорбент «фолиокс» (хромо-калиевый)*

$С_{исх}$=18,8 мг/дм^3	Скорость фильтрации				
Концентрация фосфатов в растворе С (мг/дм^3)	25 мл/мин	10-15 мл/мин	3-5 мл/мин	1,2-2 мл/мин	Концентрация снижается в 3,5 раз
	10,8	9,5	5,2	4,9	

и) Очистка воды от ионов никеля (Ni^{2+}) в динамических условиях. ПДК фосфат-ионов в сточных водах промышленных предприятий 3,5 мг/дм^3 . Колоночный объем сорбента $V_к$=45,3 мл. Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл. Отношение $\frac{V_к}{V_р}$=0,09.

Таблица 11. *Сорбент «фолиокс» (хромо-калиевый)*

$C_{исх}$=1,5 мг/дм^3	Скорость фильтрации				
Концентрация ионов никеля в растворе С (мг/дм^3)	25 мл/мин	10-15 мл/мин	3-5 мл/мин	1,5-2 мл/мин	Концентрация снижается в 15 раз
	0,5	0,1	0,1		

к) Очистка воды от ионов меди ($Cu^{2+\cdot}$) в динамических условиях. ПДК ионов меди в сточных водах промышленных предприятий 0,1 мг/дм^3 . Колоночный объем сорбента $V_к$=45,3 мл. Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл.

Таблица 12. *Сорбент «фолиокс» (хромо-калиевый)*

$C_{исх}$=0,4 мг/дм^3	Скорость фильтрации				
Концентрация ионов меди в растворе С (мг/дм^3)	25 мл/мин	10-15 мл/мин	3-5 мл/мин	1,5-2 мл/мин	Концентрация снижается в 4 раза
	0,3	0,3	0,2	0,1	

л) Очистка воды от фосфат ионов (PO_4^{3-}) в динамических условиях. ПДК фосфат-ионов в сточных водах промышленных предприятий 3,5 мг/дм^3 . Колоночный объем сорбента $V_к$=18,7 мл. Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл. Отношение $\frac{V_к}{V_р}$=0,04.

Таблица 13. *Сорбент «фолиокс» (хромо-калиевый)*

$C_{исх}$=18,05 мг/дм^3	Скорость фильтрации				
Концентрация фосфат ионов в растворе С (мг/дм^3)	25 мл/мин	10-15 мл/мин	3-5 мл/мин	1,5-2 мл/мин	Концентрация снижается в 1,6 раза
	13,5	12,2	11,7	10,9	

м) Очистка воды от хлорид ионов (Cl^-) в динамических условиях. ПДК хлорид-ионов в сточных водах промышленных предприятий 100 мг/дм^3 . Колоночный объем сорбента $V_к$=18,7 мл. Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл. Отношение $\frac{V_к}{V_р}$=0,04.

Таблица 14. *Сорбент «фолиокс» (САК-0,1)*

$C_{исх}$=177,3 мг/дм^3	Скорость фильтрации				
Концентрация хлорид ионов в растворе С (мг/дм^3)	25 мл/мин	10-15 мл/мин	3-5 мл/мин	1,5-2 мл/мин	Концентрация снижается в 2,3 раза
	124,3	98,7	90,5	78,1	

н) Очистка воды от сульфат ионов (SO_4^{2-}) в динамических условиях. ПДК cekmafn-ионов в сточных водах промышленных предприятий 100 мг/дм^3 . Колоночный объем сорбента $V_к$=18,7 мл. Объем очищаемого раствора $V_р$=500 мл. Отношение $\frac{V_к}{V_р}$=0,04.

Таблица 15. *Сорбент «фолиокс» (САК-0,1)*

$C_{исх}$=547 мг/дм^3	Скорость фильтрации				
Концентрация сульфат ионов в растворе С (мг/дм^3)	25 мл/мин	10-15 мл/мин	3-5 мл/мин	1,5-2 мл/мин	Концентрация снижается в 1,4 раза
	480	447,7	407,7	385	

Результаты определения СОЕ для некоторых загрязнений сорбентами «фолиокс» -хромокалиевый и «фолиокс» (САК-0,1) согласно ГОСТ 20.255.1-89 приведены в таблице 16 [5].

Таблица 16. *Результаты определения СОЕ для некоторых загрязнений*

Сорбент	СОЕ (мг-экв/г)					
	PO_4^{3-}	SO_4^{2-}	Cl^-	Fe^{3+}	Co^{2+}	Ni^{2+}
«фолиокс» (САК-0,1)	3,5	2,7	1,8	7,5	6,8	6,4
«фолиокс» хромокалиевый	5,5	4,3	2,1	6,6	5,6	5,7

Проведенные исследования сорбционных и ионообменных свойств материалов на основе лигнина (фолиокс САК-0,1; Фолиокс- хромо-калиевый) показали, что выбранные модификации после механохимической обработки [2] обладают свойствами амфолита, которые в широких пределах pH участвуют в процессах ионного обмена (как катионит или анионит).

Выводы

Главным критерием эффективности сорбентов при очистке сточных вод, является достижение ПДК в соответствии с экономической целесообразностью их использования (стоимость: сырья, изготовления и утилизации). На эффективность сорбента типа «фолиокс» влияет следующие фиизко-химические параметры:

1. Химический состав среды;
2. Соотношение массы сорбента и очищаемой среды ($\frac{V_{сорб}}{V_{сред}}$ или $\frac{m_{сорб}}{V_{сред}}$);
3. Ионообменная емкость сорбентов (СОЕ и ДОЕ);
4. Временные факторы: время контакта сорбент- раствор или емкость фильтрации.

В наших исследованиях (таблица 3,5,8,9,13,15) не была достигнута ПДК при $k=\frac{m_{сорб}}{V_{сред}}\approx 0.05$.

Следовательно соотношение k необходимо увеличить (определяется экспериментально); (таблица 4,6,7,11,12,14) – при заданных параметрах эффективности достигнуто ПДК.

Полученные результаты исследований могут быть использованы для выбора технологий и прогнозировании технологических процессов, при использовании оптимальных вариантов технологических схем очистки [6].

Простота изготовления, и не сложная технология его использования (отсутствие регенерационных циклов и вторичных отходов) неограниченная сырьевая база, позволяет экономически выгодно решать вопросы связанные с экологической безопасностью.

Список литературы

1. Ерофеев В.А. Природа функциональных групп после механохимической обработки растительных отходов и их взаимодействие с вредными компонентами в водной среде. / В.А. Ерофеев; Н.И. Черкашина; Э.А. Культенко // Энергетические установки и технологии.-Севастополь; СевГУ, 2018.Т.4. №2. С62-69.
2. Патент РФ №2589484. Способ получения селективного сорбента патент на изобретение / В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина, Э.А. Культенко, И.И. Пиличенко. Заявл.2015119875 подано 26.06.2015, опубл. 9.06.2016.
3. Закис Г.Ф. функциональный анализ лигнинов в их производных / Г.Ф. Закис - Рига: Зинатне, 1987-230с.
4. Культенко Э.А. Использование лигниновых сорбентов для очистки воды и технологических сред/ Э.А. Культенко, В.А. Ерофеев, Н.И. Черкашина // Тезисы докладов V международной научной конференции студентов, материалов и аспирантов. Одесса 2012, с. 177-179.
5. Черкашина Н.И. Определение кинетических характеристик сорбента для очистки ЖРО / Н.И. Черкашина, В.А. Ерофеев, Д.Ю. Сулавко. // Сборник научных работ СНУЯЭиП.- Севастополь, СНУЯиП, 2012, вып 4 (44), с. 109-113
6. Ерофеев В.А. Выбор оптимальной схемы технологического процесса очистки жидких радиоактивных отходов сложного состава лигниновыми сорбентами / В.А Ерофеев, О.В. Ворник, О.В. Ведищева // Энергетические установки и технологии- Севастополь, ИЯЭиП.: - Т.3 №1.-2015.- с.107-117.

References

1. Erofeev V.A. The nature of the functional groups after the mechanochemical treatment of plant waste and their interaction with harmful components in the aquatic environment. / V.A. Erofeev; N.I. Cherkashin; E.A. Kultenko / / Energy and technology. - 2018. – Volume 4. No. 2. – P. 62 – 69.
2. RF patent No. 2589484. A method of obtaining a selective sorbent patent for the invention / Century A. Erofeev, N.I. Cherkashina, E.A. Kultenko, I.I. Pilichenko. Application 2015119875 filed June, filed

June 26, 2015, publ.
3. Zakis G.F. functional analysis of lignins in their derivatives / G.F. Zakis - Riga: Zinatne, 1987-230 p.
4. Kultenko E.A. The use of lignin sorbents for water purification and technological environments / E.A. Kultenko, V.A. Erofeev, N.I. Cherkashin // Abstracts of the Vth international scientific conference of students, materials and graduate students. Odessa 2012, p. 177-179.
5. Cherkashin N.I. Determination of the kinetic characteristics of the sorbent for LRW treatment / N.I. Cherkashin, V.A. Erofeev, D.Yu. Sulavko. // Collection of scientific papers.- Sevastopol, 2012, issue 4 (44), p. 109-113.
6. Erofeev V.A. Choice of the optimal scheme of the technological process of purification of liquid radioactive waste of complex composition with lignin sorbents / V.A Erofeev, O. Vornik, O.V. Vedischeva // Power plants and technologies - Sevastopol.: - T.3 No. 1.-2015.- p.107-117

УДК 621.763.0.36.7:546.78:504.06

Моделирование влияния нанопрошка вольфрама на прочностные характеристики пластмасс

С.А.Федорова[1], В.М. Гавриш[2], О.П. Гавриш[3]
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, s.a.fedorova@sevsu.ru, VMGavrish@sevsu.ru, 5brachman5@gmail.com,

Статья поступила 31.10.2019 г.; после доработки 07.11.2019 г.

Аннотация

В работе проведен анализ влияния нанопорошка вольфрама на предел текучести и модуль упругости сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR 4122. Получены модельные уравнения, с использованием которых определено количество нанопорошка вольфрама, при котором достигается максимальное значение предела текучести. Количественно охарактеризовано изменение модуля упругости в зависимости от содержания нанопорошка вольфрама. По результатам исследования влияния содержания нанопорошка вольфрама в эпоксидной смоле на количество циклов при оценке истираемости был проведен корреляционный анализ и получена регрессионная зависимость.

Ключевые слова: нанопорошок W, предел текучести, модуль упругости, истираемость.

Modeling the effect of tungsten nanoprogram on the strength characteristics of plastics

S.A. Fedorova[1], V. M. Gavrish[2], O. P. Gavrish[3]
Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, s.a.fedorova@sevsu.ru, VMGavrish@sevsu.ru, 5brachman5@gmail.com,

Received 31.10.2019 y.; received in final form 07.11.2019 y.

Abstract

The paper analyzes the effect of tungsten nanopowder on yield strength and elastic modulus of ultrahigh molecular weight polyethylene of the brand GUR 4122. Model equations are obtained using which the amount of tungsten nanopowder is determined at which the maximum yield point is reached. Quantitatively characterized by a change in the modulus of elasticity depending on the content of the tungsten nanoscale. Based on the results of a study of the effect of the content of tungsten nanopowder in epoxy resin on the number of cycles, a correlation analysis was carried out when assessing abrasion and a regression dependence was obtained.

Key words: nanopowder W, yield strength, elastic modulus, abrasion.

Введение

Одним из недостатков пластмасс при использовании в качестве конструкционного материала является его малая твердость (НВ 10-30), низкая прочность. Так, разрушающее напряжение на разрыв составляет порядка 10 – 100 МПа. Кроме того, для пластмасс характерно низкое значение модуля упругости, а значит, малая жесткость материала. В среднем модуль упругости для пластмасс колеблется в интервале (7 – 10)*10^3 МПа [1]. По таким характеристикам, как твердость, истираемость, можно определить сферу их применения. Эластичные пластмассы целесообразно использовать в качестве герметиков, уплотнителей, прокладок. Прочные пластмассы являются материалов для изготовления конструкционных элементов [2].

Для модификации свойств полимеров широко используются различные добавки: для повышения прочности или снижения стоимости – наполнители; для изменения эксплуатационных или технологических свойств – пластификаторы; для повышения эксплуатационной и технологической стабильности – стабилизаторы; фрикционные и антфрикционные добавки и т.п. Состав добавок имеет широкий спектр используемых материалов: от волокнистых покрытий, керамических матриц до оксидов сурьмы, дисульфида молибдена, дисульфида вольфрама, наночастиц меди и т.п. [3-8].

В нашей работе мы исследовали изменение свойств пластмасс при введении нанопорошка вольфрама, полученного при переработке твердосплавленных отходов методом биодеструкции.

Цель исследования: анализ использования нанопорошка вольфрама, полученного при переработке твердосплавленных отходов методом биодеструкции, на изменение свойств пластмасс.

Задачи исследования:

1. Анализ прочностных характеристик полиэтилена марки GUR 4122 при добавлении нанопорошка вольфрама.
2. Анализ истираемости эпоксидной смолы ТУ 2252-003-62517430-01 при добавлении нанопорошка вольфрама.

Анализ прочностных характеристик полиэтилена марки GUR 4122 при добавлении нанопорошка вольфрама

Исследование влияния нанопорошка вольфрама на сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 проводили по определению предела текучести и модуля упругости в зависимости от концентрации нанопорошка вольфрама. Свойства исходного полимера представлены в таблице 1 [9].

Таблица 1. *Некоторые свойства сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122*

Показатели	Значение
Плотность, г/см3	0,93
Предел текучести при растяжении, МПа	≥ 17
Модуль упругости при растяжении, МПа	790

Нанопорошок вольфрама равномерно распределяли в сверхвысокомолекулярном полиэтилене марки GUR 4122 во вращающемся электромагнитном поле. Из полученного материала готовили образцы для исследования методом компрессионного прессования при Е-433 К, Р- 20 Мпа. Результаты исследования представлены на рисунке 1.

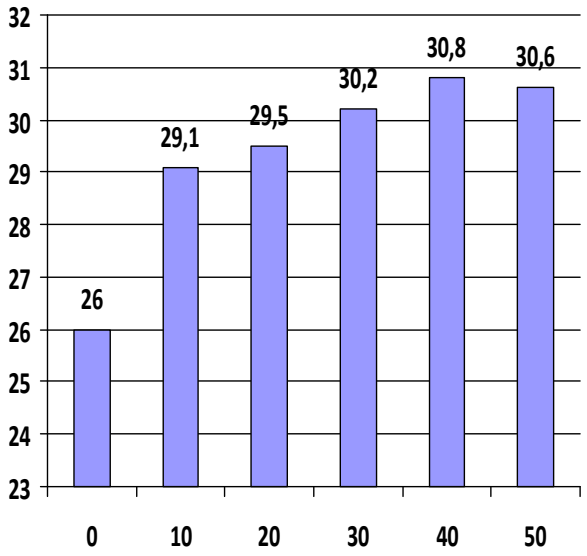


Рис.1. Зависимость предела текучести (МПа) сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 от концентрации нанопорошка вольфрама (%, масс)

Полученные данные мы аппроксимировали полиномиальной зависимостью 5-го порядка, выполненной средствами расчета линии тренда в Excel.

$$y = 26{,}1 + 0{,}6692x - 0{,}0551x^2 + 0{,}00022x^3 - 4 \cdot 10^{-4}x^4 + 2 \cdot 10^{-7}x^5$$

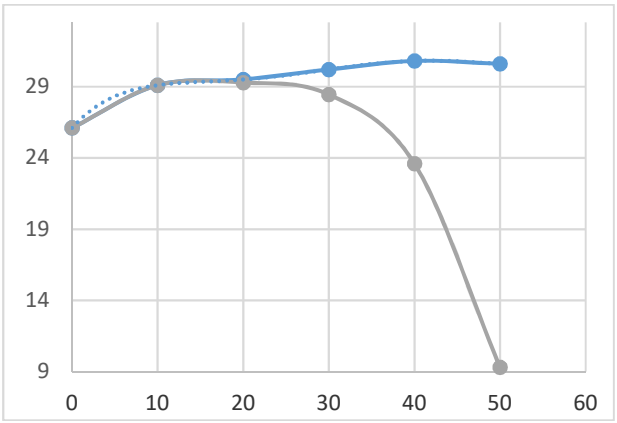


Рис.3. Экспериментальная и расчетная (Excel) ззависимости предела текучести (МПа) сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 от концентрации нанопорошка вольфрама (%, масс)

Результаты, представленные на рисунке 3, показывают расхождение в трех точках, что не может адекватно описывать процесс. Мы эмпирическим путем доработали полиномиальную зависимость (коэффициенты регрессии)

$$y = 26{,}1 + 0{,}6692x - 0{,}0555779x^2 + 0{,}0002247x^3 - 4{,}098 \cdot 10^{-4}x^4 + 2{,}725 \cdot 10^{-7}x^5$$

и получили результаты, представленные в таблице 2.

Таблица 2. *Результаты аппроксимации экспериментальных данных по влиянию концентрации нанопорошка вольфрама на предел текучести GUR 4122*

W, %, масс	Предел текучести, Мпа		
	Эксперимент	Расчет, Excel	Расчет, эмпирич
0	26,1	26,10	26,10
10	29,1	29,10	29,10
20	29,5	29,28	29,54
30	30,2	28,45	30,25
40	30,8	23,59	30,75
50	30,6	9,31	30,52

По выведенной эмпирической зависимости можно вычислить оптимум функции, т.е. максимальную концентрацию нанопорошка вольфрама, при которой достигается максимальное значение предела текучести.

Расчетные значения оптимума представлены в таблице 3.

Таблица 3. *Определение концентрации нанопорошка вольфрама для достижения максимального предела текучести GUR 4122*

W,%	40,2	40,4	40,6	40,8	41
МПа	30,7475	30,74805	30,7482	30,74798	30,74737

Как следует из результатов расчета, приведенных в таблице 3, максимальное значение предела текучести сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR 4122 30,7482 Мпа достигается при концентрации нанопорошка вольфрама 40,6 %.

Значительный скачек предела текучести наблюдается при концентрации нанопорошка вольфрама 10%.

Дальнейшее увеличение добавки до 50% приводит к увеличению предела текучести на 5%, что нецелесообразно. Введение 10% нанопорошка вольфрама позволяет увеличить прочностную характеристику на 12 %.

В дальнейшей работе была определена зависимость модуля упругости сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 от концентрации нанопорошка вольфрама. Результаты представлены на рисунке 4.

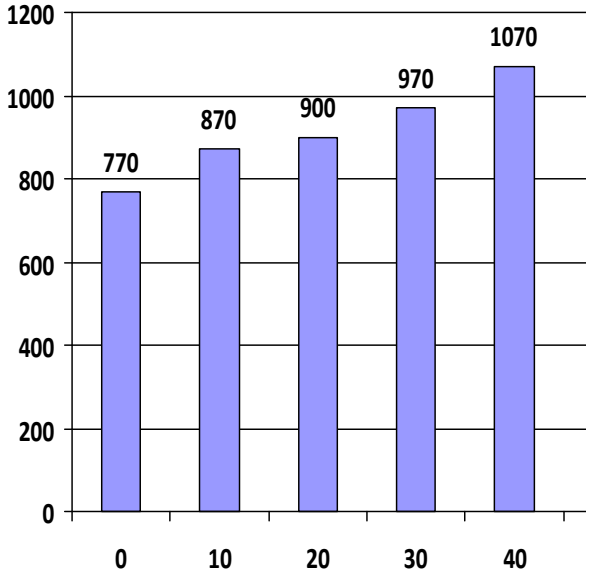


Рис.4. Зависимость модуля упругости сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 (МПа) от концентрации нанопорошка вольфрама (%, масс)

Результаты были аппроксимированы полиномом 4-го порядка. Множественный коэффициент регрессии равен 1. Расчетные и экспериментальные значения представлены в таблице 4.

$$y = 770 + 20{,}167x - 1{,}45x^2 + 0{,}0483x^3 - 0{,}0005x^4$$

Таблица 4. *Сходимость экспериментальных и расчетных данных при определении модуля упругости сверхвысокомолекулярного полиэтилен марки GUR 4122 с добавкой нанопорошка вольфрама*

Конц. W, % масс	Модуль упругости при растяжении	
	эксперимент	расчет
0	770	770
10	870	869,97
20	900	899,74
30	970	969,11
40	1070	1067,88

Существенное изменение модуля упругости происходит при добавлении 10% нанопорошка вольфрама (на 13%).

Анализ истираемости эпоксидной смолы ТУ 2252-003-62517430-01 при добавлении нанопорошка вольфрама.

Анализ истираемости эпоксидной смолы, модифицированной нанопорошком вольфрама проводили стандартные циклы истирания металлической стружкой.

Образцы для испытаний готовили смешиванием эпоксидной смолы ТУ 2252-003-62517430-01 с нанопорошком вольфрама. Смесь при постоянном перемешивании заливали в формы, которые оставляли на 5 суток, Т= 393 – 298 К.

Результаты испытаний приведены на рисунке 5.

По результатам исследования влияния концентрации порошка вольфрама в эпоксидной смоле на количество циклов на истираемость был проведен корреляционный анализ. Показана очень тесная прямая корреляционная связь между содержанием нанопорошка вольфрама в модифицированной им эпоксидной смоле и количеством циклов.

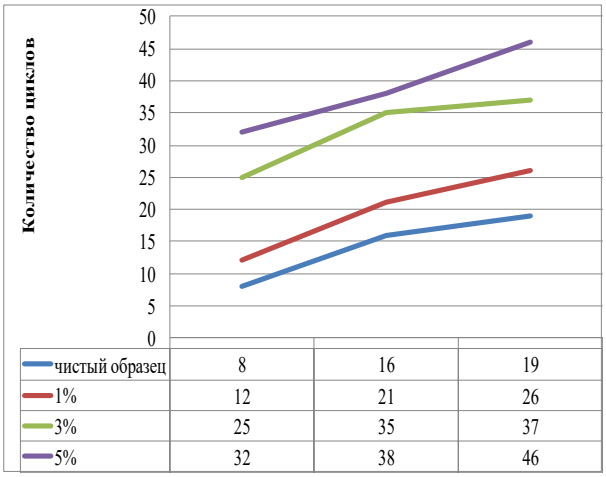


Рис.5. Испытание эпоксидной смолы ТУ 2252-003-62517430-01 при добавлении различного количества нанопорошка вольфрама (%, масс)

Наличие выявленной корреляционной связи позволило определить регрессионную модель в первом приближении (малая выборка данных).

$$y = -0{,}4818 + 0{,}8157x_1 + 0{,}1432x_2 - 0{,}1527x_3$$

Был проведен выборочный расчет по полученному уравнения для образца эпоксидной смолы не модифицированного нанопорошком вольфрама, и композита с 3%-ным содержанием нанопорошка вольфрама. Результаты приведены в таблице 5.

Таблица 5. *Сходимость экспериментальных и расчетных данных при определении истираемости эпоксидной смолы ТУ 2252-003-62517430-01 в зависимости от количества нанопорошка вольфрама*

	Эксп.	Расчет	Эксп.	Расчет
W, % масс	0	0	3	3,2
Количество циклов	8	7,94	25	25,44
	16	15,87	36	30,3
	19	18,86	37	36,78

Таким образом, количество циклов при определении истираемости прямо пропорционально количеству введенного нанопорошка вольфрама.

Выводы

В ходе проведенного исследования был проведен анализ прочностных характеристик сверхвысокомолекулярного полиэтилена марки GUR 4122 при добавлении нанопорошка вольфрама. Было определено влияние нанопорошка вольфрама на увеличение предела текучести и модуля упругости сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122. Эти зависимости охарактеризованы количественно.

Показано, что расчеты аппроксимации зависимостей линиями тренда не всегда адекватны рассматриваемому процесс.

Были эмпирически рассчитаны коэффициенты полиномиальной зависимости, которые достоверно охарактеризовали изменение предела текучести сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 при различных концентрациях нанопорошка вольфрама.

С использованием полученной модели было определено максимальное значение предела текучести при модификации сверхвысокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 нанопрошоком вольфрама. Получена высокая сходимость результата с экспериментальными данными.

Получено модельное уравнение зависимости модуля упругости сверхвысокомолекулярного полиэтилен марки GUR 4122 от содержания нанопорошка вольфрама.

Был проведен анализ истираемости эпоксидной смолы ТУ 2252-003-62517430-01 при добавлении нанопорошка вольфрама.

По результатам исследования влияния концентрации порошка вольфрама в эпоксидной смоле на количество циклов на истираемость был проведен корреляционный анализ. Наблюдается прямая очень тесная корреляционная связь между содержанием нанопорошка оксида

вольфрама и количеством циклов при проверке образцов на истираемость.

Получено регрессионное уравнение, которое показало высокую согласованность экспериментальных и расчетных данных.

Экспериментальные исследования проведены на базе Научно-образовательного центра «Перспективные технологии и материалы» СевГУ.

Список литературы

1. Inzhener-Info.ru Справочник инженера: Пластмассы для изготовления детелей: виды, свойства, применение https://inzhener-info.ru /razdely/konstruirovanie/detali-iz-plastmass/ plastmassy-dlya-izgotovleniya-detalej-vidy-svojstva-primenenie.html
2. Plastinfo: Основные критерии выбора пластмасс для изготовления конечного изделия https://plastinfo.ru/information/articles/63
3. Plastinfo: Создание полимерных материалов со специальными свойствами https://plastinfo.ru/information/articles/300
4. Радюк А.Н. Получение и свойства композиционных полимерных материалов с волокнистыми наполнителями/ Тезисы докладов У республиканской научно-технической конференции «новые функциональные материалы, современные технологии и методы исследования, Гомель, 12-14 ноября 2018. С.27-28.
5. Войцик В.Ф. Сравнительный анализ износа полимерных композитов, имеющих в качестве наполнителя Cu Bn. / Войцик В.Ф., Кондратюк А.А., Вицке Р.Э. // Сб. трю Междунар. Конф. С элементами научной школы для молодежи «Материалы и технолгии новых поколений в современном материаловедении. - Национальный исследовательский Томский политехнический университет. 2015. С. 91-96.
6. Крушенко Г.Г. Наномодифицирование полимерного связующего с целью повышения свойств углепластиковых материалов, / Крушенко Г.Г., Исеева О.А. //Сибирский журнал науки и технологий. 2017. Т. 18. № 3. С. 651-657.
7. Полубояров В.А. Свойства нанокомпозитов / Полубояров В.А., Коротаева З.А., Белкова Т.Б., Гончаров А.И., Трофимова А.С. // Вестник Кемеровского государственного университета. 2010. № 1 (41). С. 22-27.
8. Каримов Э.Х. Влияние наночастиц металла на механические характеристики композитных материалов / Каримов Э.Х., Каримов О.Х., Мовсумзаде Э.М., Боев Е.В. // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2017. Т. № 4. С. 22-47.
9. Гавриш В.М. Анализ влияния наномодификатора порошка вольфрама на высокомолекулярный полиэтилен марки GUR 4122 и клей эпоксидный ТУ 2252-003-62517430-01 / В.М. Гавриш, А.А. Бурьянская, Г.А.Баранов, О.П. Гавриш //Актуальные вопросы ядерно-химических технологий и экологической безопасности сборник статей по материалам научно-практической конференции. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет». 2016. С. 189-194.https://elibrary.ru/item.asp?id=27270486

References

1. Inzhener-Info.ru Spravochnik inzhenera: Plastmassy dlya izgotovleniya detelej: vidy, svojstva, primenenie
1. https://inzhener-info.ru /razdely/ konstruirovanie/detali-iz-plastmass/plastmassy-dlya-izgotovleniya-detalej-vidy-svojstva-primenenie.html
2. Plastinfo: Osnovnye kriterii vybora plastmass dlya izgotovleniya konechnogo izdeliya https://plastinfo.ru/information/articles/63
3. Plastinfo: Sozdanie polimernyh materialov so special'nymi svojstvami https://plastinfo.ru/information/articles/300
4. Radyuk A.N. Poluchenie i svojstva kompozicionnyh polimernyh materialov s voloknistymi napolnitelyami/ Tezisy dokladov U respublikanskoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «novye funkcional'nye materialy, sovremennye tekhnologii i metody issledovaniya, Gomel', 12-14 noyabrya 2018. S.27-28.
5. Vojcik V.F. Sravnitel'nyj analiz iznosa polimernyh kompozitov, imeyushchih v kachestve napolnitelya Su Bn. / Vojcik V.F., Kondratyuk A.A., Vicke R.E. // Sb. tryu Mezhdanar. Konf. S elementami nauchnoj shkoly dlya molodezhi «Materialy i tekhnolgii novyh pokolenij v sovremennom materialovedenii. - Nacional'nyj issledovatel'skij Tomskij politekhnicheskij universitet. 2015. S. 91-96.
6. Krushenko G.G. Nanomodificirovanie polimernogo svyazuyushchego s cel'yu povysheniya svojstv ugleplastikovyh materialov, / Krushenko G.G., Iseeva O.A. //Sibirskij zhurnal nauki i tekhnologij. 2017. T. 18. № 3. S. 651-657.
7. Poluboyarov V.A. Svojstva nanokompozitov / Poluboyarov V.A., Korotaeva Z.A., Belkova T.B., Goncharov A.I., Trofimova A.S. // Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta. 2010. № 1 (41). S. 22-27.
8. Karimov E.H. Vliyanie nanochastic metalla na mekhanicheskie harakteristiki kompozitnyh materialov / Karimov E.H., Karimov O.H., Movsumzade E.M., Boev E.V. // Nanotekhnologii v stroitel'stve: nauchnyj internet-zhurnal. 2017. T. № 4. S. 22-47.
9. Gavrish V.M. Analiz vliyaniya nanomodifikatora poroshka vol'frama na vysokomolekulyarnyj polietilen marki GUR 4122 i klej epoksidnyj TU 2252-003-62517430-01 / V.M. Gavrish, A.A. Bur'yan-

skaya, G.A.Baranov, O.P. Gavrish //Aktual'nye voprosy yaderno-himicheskih tekhnologij i ekologicheskoj bezopasnosti sbornik statej po materialam nauchno-prakticheskoj konferencii. FGAOU VO «Sevastopol'skij gosudarstvennyj universitet». 2016. S. 189-194. https://elibrary.ru/item.asp?id=27270486

УДК 630.867:661.183.2

Адсорбционные характеристики сорбента на основе рисовой шелухи при извлечении меди 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 25.10.2019 г.; после доработки 29.10.2019 г.

Аннотация

Определены сорбционные характеристики: коэффициент очистки, коэффициент распределения, степень извлечения ионов меди из раствора. Проведен сравнительный анализ степени извлечения меди 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 husk sorbent in copper extraction in single and binary systems

N.I. Cherkashina
Sevastopol State University, 33 Universitetskayast,, Sevastopol, 299053, Russia
[1]selyanskij-as@ya.ru

Received 25.10.2019 y.; received in final form 29.10.2019 y.

Abstract

Sorption characteristics are defined: cleaning coefficient, distribution coefficient, extent of extraction of ions of copper from solution. The comparative analysis of extent of extraction of copper 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.

Специалистами по охране окружающей среды среди металлов-токсикантов выделена приоритетная группа. В нее входят кадмий, медь, мышьяк, никель, ртуть, свинец, цинк и хром как наиболее опасные для здоровья человека и животных. Из них ртуть, свинец и кадмий наиболее токсичны.

Токсическое действие тяжёлых металлов на организм усиливается тем, что многие тяжелые металлы проявляют выраженные комплексообразующие свойства.

В водных средах ионы этих металлов гидратированы и способны образовывать различные гидроксокомплексы, состав которых зависит от кислотности раствора. Если в растворе присут-

ствуют какие-либо анионы или молекулы органических соединений, то ионы тяжёлых металлов образуют разнообразные комплексы различного строения и устойчивости.

Хорошо известно, что некоторые металлы могут быть токсичными или вредными и влияют на многие формы жизни. Среди наиболее токсичных – Cu, Pb, Zn и Hg, которые являются одними из опасных в списке загрязняющих веществ, содержащихся в директиве по воде (Директива 2000/60 / ЕС).

К возможным источникам загрязнения биосферы соединениями 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.

При сегодняшнем высоком употреблении меди в промышленности и сельское хозяйство, этот металл может послужить причиной загрязнения окружающей среды.

ПДК меди для водной среды считается 0,1 мг/л, содержание меди в реках, как правило, 2 — 30 мкг/л, в морях — 0,5 — 3,5 мкг/л. Высокий уровень меди в реках и озерах говорит о загрязнении.

Целью данной работы является исследование адсорбционных характеристик органических сорбентов на основе рисовой шелухой при извлечении меди в присутствии конкурентных ионов Fe (III), 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.

Для решения поставленной задачи, объектом исследования выбраны обработанные механохимическими 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

Приготовление модельного раствора меди. Для сорбции рисовой шелухой готовится раствор меди с концентрацией 1мг/мл, после чего берется аликвота 2,5 мл раствора исследуемого иона и 2,5 раствора конкурирующего иона, 5 мл дистиллированной воды. В химическом стакане данной смесью заливается навеска сорбента с массой 0,1 мг.

Реактивы и оборудование:

1. Стандартный с концентрацией 1 мг/мл раствор соли меди Cu (II).
2. 5%-ный раствор аммиака.
3. Колбы мерные на 50 мл.
4. Бюретки на 25 мл.
5. Цилиндр мерный вместимостью 10 мл.
6. Фотоэлектрический фотометр КФК-3-01 ЗОМЗ.

При приготовлении стандартного раствора необходимо перекристаллизовывать кристаллы из кипящей воды и высушить при 105°С.

Устранение мешающих ионов.

Мешающее влияние свинца устраняется осаждением его в виде гидроксида. Определению меди мешают катионы железа необходимо произвести разделение этих катионов. Для этой цели берут 5 мл пробы, приливают 20 мл 1 н. раствора хлористого аммония. Содержимое стакана нагревают и к горячему раствору приливают 25 – 50 мл 2 н. раствора гидроокиси аммония (контроль полноты осаждения железа определяется

по образованию интенсивно темно-синего цвета pH – 9).

Происходит выпадения железа в осадок при этом выпадает в осадок в виде гидроокиси, а гидроокись меди растворяется с образованием синего аммиачного комплекса меди.

Нагревание раствора необходимо для лучшей коагуляции осадка гидроокиси железа. Осадок отфильтровывают через воронку Бюхнера с двумя плотными фильтрами и промывают горячей дистиллированной водой. На фильтре остается двух- и трехвалентное железо, а двухвалентная медь переходит в фильтрат.

Нагревание раствора необходимо для лучшей коагуляции осадка гидроокиси железа. Осадок отфильтровывают через воронку Бюхнера с двумя плотными фильтрами и промывают горячей дистиллированной водой. На фильтре остается двух- и трехвалентное железо.

Выполнение работы методом градуировочного графика.

Необходимо приготовить 5 стандартных растворов, содержащих 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5 мг Cu (II) в 50 мл для этого в мерные колбы на 50 мл вносится 2,5; 5,0; 7,5; 10,0; 12,5 стандартного раствора Cu (II) прибавляют в каждую колбу по 10мл 5 %-ного раствора аммиака и доводят до метки дистиллированной водой, раствор перемешивают и оставляют выдерживать на 10 минут для завершения реакции.

В области 600 – 700 нм через каждые 10 – 20 нм необходимо произвести измерение оптической плотности стандартного самого интенсивно окрашенного раствора в кюветах с толщиной поглощающего слоя 20 мм относительно раствора сравнения в качестве которого выступает дистиллированная вода.

Наибольшая оптическая плотность наблюдалась при длине волны равной 600 нм. Далее проводится измерение оптической плотности стандартных растворов в тех же кюветах при найденной длине волны. Каждое измерение повторяется до трёх воспроизводимых результатов.

Анализируемые растворы готовят с добавлением тех же реагентов. Измерение их оптической плотности проводится при аналогичных условиях.

Спектрофотометрическое определение меди в присутствии никеля и кобальта проходит с добавлением ацетона при длине волны равной 475 нм.

По трем результатам оптической плотности стандартных растворов рассчитывается среднее значение и строится градуировочный график, далее по значению оптической плотности исследуемого раствора с помощью графика определяют соответствующее значение концентрации.

Для определения количества меди в растворе необходимо построение градуировочного графика.

Таблица 1. *Результаты определения оптической плотности стандартных растворов*

№ раствора	Масса меди в растворе, мг	Оптическая плотность
1	2,5	0,020
2	5	0,041
3	7,5	0,053
4	10	0,069
5	12,5	0,082

Таблица 2. *Экспериментальные и расчетные данные для оценки оптимальных параметров по методу наименьших квадратов*

№ раствора	m_i	m_i^2	$A_{i\ эксп}$	$m_i \cdot A_{i\ эксп}$
1	2,5	6,25	0,020	0,0042
2	5	25	0,041	0,0174
3	7,5	56,25	0,053	0,0377
4	10	100	0,069	0,0746
5	12,5	156,25	0,082	0,1013
$\sum_{i=1}^{n}$	37,5	343,75	0,265	2,368
№ раствора	m_i	m_i^2	$A_{i\ эксп}$	$m_i \cdot A_{i\ эксп}$

Расчет коэффициентов для оценки оптимальных параметров по данным из таблицы 2.

$$a = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i^2 \sum_{i=1}^{n} A_{i_{эксп}} -}{n\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} m_i)^2}$$

$$\frac{-\sum_{i=1}^{n} m_i^2 \sum_{i=1}^{n} m_i A_{i_{эксп}}}{n\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} m_i)^2} = 0{,}0074$$

$$b = \frac{n\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i_{эксп}} -}{n\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} m_i)^2}$$

$$\frac{-\sum_{i=1}^{n} m_i \sum_{i=1}^{n} A_{i_{эксп}}}{n\sum_{i=1}^{n} m_i^2 - (\sum_{i=1}^{n} m_i)^2} = 0{,}00608$$

$$b' = \frac{\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i_{эксп}}}{\sum_{i=1}^{n} m_i^2} = 0,0069$$

$$SQ = \sum_{i=1}^{n} A^2_{i\,эксп} - a\sum_{i=1}^{n} A_{i_{эксп}} - b\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i_{эксп}} = 1,96\cdot10^{-5},$$

$$S^2_{YC} = \frac{\sum_{i=1}^{n} A^2_{i\,эксп} \; a \sum_{i=1}^{n} A_{i_{эксп}} - \frac{-b\sum_{i=1}^{n} m_i A_{i_{эксп}}}{(n-2)} = 6,53\cdot10^{-6}$$

$$SQ' = \sum_{i=1}^{n} A^2_{i\,эксп} - b' \sum_{i=1}^{n} m_i A_{i_{эксп}} = 6,94\cdot10^{-5},$$

$$F = \frac{SQ' - SQ}{S^2_{YC}} = 7,62$$

,

$F(\overline{P}, f_1 = n - 1, f_2 = n - 2)$ (табличное) = 6,39.

Так как фактическое значение F> F табличное, то оценка уравнения регрессии статистически надежна.

Градуировочная зависимость определяется по формуле:

$$A_{расч} = a + b\cdot m. \quad (1)$$

Таблица 3. *Расчетные данные*

№ п/п	m	$A_{расч}$
1	2,5	0,0226
2	5	0,0378
3	7,5	0,053
4	10	0,0682
5	12,5	0,0834

По данным таблицы 3 строится градуировочный график рисунок 1 для определения концентрации иона металла анализируемого раствора.

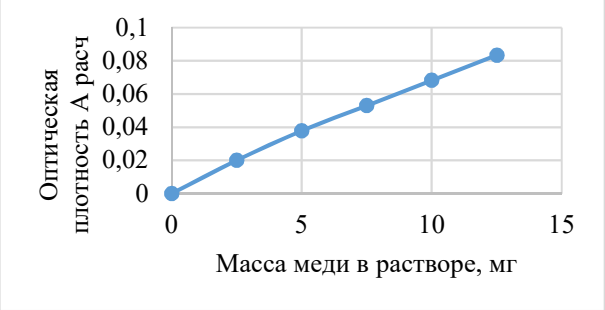


Рис. 1. Градуировочный график для расчета меди.

Масса свинца рассчитывается из градуировочной зависимости по формуле 1.

Концентрация меди в анализируемом растворе определяется по формуле 2 [10-12].

$$C_{Pb} = \frac{m_X}{V}, \quad (2)$$

где V – объем анализируемого раствора;

Таблица 4. *Результаты измерений и расчетов для анализа количества меди в растворе*

№ измерения	Состав пробы	A	m_X, мг	C_{Cu}, мг/мл
1	Cu^{2+}	0,06	8,651	0,173
2	Cu^{2+}+Ni^{2+}	0,081	12,105	0,242
3	Cu^{2+}+Pb^{2+}	0,073	10,789	0,216
4	Cu^{2+}+Co^{2+}	0,082	12,270	0,245
5	Cu^{2+}+Fe^{3+}	0,075	11,118	0,222
6	Cu^{2+}+ Zn^{2+}	0,068	9,967	0,199

Далее проводится расчет сорбционных характеристик для сорбции меди.

Сначала рассчитывается коэффициент очистки, исходная концентрация меди 0,25 мг/мл, равновесная – концентрация ионов после сорбции. Коэффициент распределения находится по формуле 3.

$$E = \left(1 - \frac{1}{K_{оч}}\right)\cdot 100\% \quad (3)$$

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 5.

Таблица 5. *Результаты расчета адсорбционных характеристик сорбции меди*

№ измерения	Состав пробы	$K_{оч.}$	E, %
1	Cu^{2+}	1,445	30,79
2	Cu^{2+}+Ni^{2+}	1,033	3,16
3	Cu^{2+}+Pb^{2+}	1,159	13,68
4	Cu^{2+}+Co^{2+}	1,019	1,84
5	Cu^{2+}+Fe^{3+}	1,124	11,05
6	Cu^{2+}+ Zn^{2+}	1,254	20,26

Как видно из таблицы 6 медь наиболее сорбируется из раствора в присутствии цинка, свинца и железа. Остальные ионы являются сильными конкурентами.

Выводы

Исследована эффективности сорбции органическим сорбентом на основе рисовой шелухой (RHA) при извлечении Cu (II) в присутствии тяжелых металлов Fe (III), 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. Ерофеев В.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 patent-

winner 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. Texnologijapolychenijzsorbcionnixmaterialovnaosnovelignindljaytilizaciijidkihradioaktivnixotxodov[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. ispolzovaniesorbentovnaosnoveothodovpererabotkirastitelnogosirjzpriochistkestochnixvod I tehnologicheskixsred [The use of sorbents based on waste processing of vegetable raw materials in the purification of wastewater and technological environments.] 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. Cherkashin // 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. Lyubushkina, 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 502.174

Использование двухкамерных электролизеров для выделения из воды хлоридов и сульфатов

Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук, Е.В. Заблоцкая
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33, г. Севастополь, 299053, Россия, Galina_kucherik@mail.ru

Статья поступила 08.11.2019 г.; после доработки 11.11.2019 г.

Аннотация

В статье представлены результаты изучения процессов электролиза модельных растворов, содержащих повышенные концентрации хлоридов, сульфатов, а также ионы жесткости с целью опреснения данных растворов и умягчения воды за счет повышения уровня pH раствора. Показано, что при выделении хлоридов в двухкамерном электролизере наряду с выделением хлора происходит эффективное умягчение воды. Также двухкамерный электролизер был использован при изучении процессов электрохимического выделения сульфатов из водопроводной воды. Показано, что степень извлечения сульфатов в зависимости от времени процесса достигает достаточно высоких значений. При этом установлено, что при электролизе водопроводной воды наряду с выделением сульфатов происходит умягчение воды. Эффективность умягчения возрастает с увеличением времени электролиза и концентрации сульфата натрия.

Ключевые слова: двухкамерный электролизер, деминерализация, сульфаты, умягчение, хлориды, электролиз.

The use of two-chamber electrolyzers for the separation of chlorides and sulfates from water

G.V. Kucherik, Yu.A. Omelchuk, E.V. Zablotskaya
Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, Galina_kucherik@mail.ru

Received 08.11.2019 y.; received in final form 11.11.2019 y.

Abstract

The article studies the processes of electrolysis of model solutions containing high concentrations of chloride and sulfate ions, as well as hardness ions in order to desalinate these solutions and soften water by increasing the pH level of the solution. It is shown that the separation of chlorides in a two-chamber electrolyzer along with the release of chlorine occurs effective softening of water. Also, a two-chamber electrolyzer was used in the study of the electrochemical separation of sulfates from tap water. It is shown that the degree of extraction of sulfates, depending on the time of the process, reaches sufficiently high values. It was found that the electrolysis of tap water, along with the release of sulfates, softens the water. The softening efficiency increases with increasing electrolysis time and sodium sulfate concentration.

Keywords: two-chamber electrolyzer, demineralization, sulfates, softening, chlorides, electrolysis.

Введение

Минерализованные природные, шахтные и сточные воды, как правило, содержат в повышенных концентрациях сульфаты, хлориды, ионы жесткости и ионы натрия.

Нитраты присутствуют в основном в подземных водах. Сульфаты в природных и сточных водах могут присутствовать в концентрациях от 20–30 мг/дм^3 до 800–1000 мг/дм^3. Концентрации хлоридов могут изменяться в ещё большем диапазоне.

Сложность проблемы повышенной минерализации воды, когда общее солесодержание превышает уровень 1 г/дм^3, состоит в том, что очистить воду от солей на существующих станциях водоподготовки невозможно. Традиционными технологиями воду можно чистить от взвешенных и коллоидных примесей, от микроорганизмов, в отдельных случаях – от тяжелых металлов. Однако эти методы не позволяют снизить уровень минерализации. На предприятиях воду опресняют с помощью ионного обмена [1,2] или баромембранными методами [3,4], что приводит к получению концентратов, методы переработки которых сводятся к выпариванию рассолов, что является экономически нецелесообразным. Кроме того, захоронение твердых отходов, содержащих хлорид и сульфат натрия, является еще более проблематичным, чем утилизация жидких отходов. Зачастую перерабатывать образующиеся элюаты или концентраты, содержащие от 4 до 50 г/дм^3 солей, не могут и сбрасывают в водоемы, ухудшая и без того низкое качество воды в них.

Одним из решений задачи очистки воды от хлоридов и сульфатов может быть использование электролиза для очистки воды.

Главными проблемами, которые возникают при очистке природных вод электрохимическим методом, является присутствие ионов жесткости, что затрудняет катодные процессы из-за выделения гидрооксидов кальция и магния на катоде, а также сложность выделения сульфатов в однокамерном электролизёре, восстановление активного хлора на катоде в данных условиях, а также сложность разделения хлоридов и сульфатов в случае выделения кислот. Поэтому в работе использовали двухкамерные электролизёры, в которых за счёт разделения катодного и анодного пространства можно было лучше контролировать и регулировать процессы выделения минеральных примесей из воды. Данный подход позволяет не только решить указанные проблемы, но и дает возможность получать продукты, пригодные для вторичного использования в производстве и технологиях очистки воды. Из хлорида натрия можно получать щелочь, гипохлорит натрия или соляную кислоту [5], из сульфатов – щелочь и серную кислоту [6].

Постановка задачи

Цель исследования заключалась в изучении процессов очистки вод, содержащих повышенные концентрации хлоридов и сульфатов, в присутствии ионов жесткости в двухкамерных электролизерах с возможностью получения готовых продуктов, пригодных для дальнейшего использования.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

- изучить процессы электрохимического выделения сульфатов и хлоридов из водных растворов в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41);
- оценить возможность умягчения воды при очистке воды от хлоридов и сульфатов.

Описание исследования

Выделение хлоридов из воды является актуальной, но достаточно сложной проблемой. Наиболее надежным и эффективным методом является использование выпарных установок [7]. Однако данная технология является весьма энергоемкой и дорогостоящей. Кроме того, на сегодня объемы производства хлорида натрия из промышленных отходов в 2 раза превышают потребности в данном продукте. Метод электродиализа сопровождается получением хлорсодержащих концентратов, утилизация которых является нерешаемой задачей. Одним из подходов, который частично позволит решить эту проблему, является выделение хлоридов из воды в двухкамерных электролизерах с получением активного хлора или гипохлорита натрия или кальция.

При этом использовали двухкамерный электролизер с анионной мембраной МА-41, которая разделяла катодную область, содержащую рабочий раствор (раствор хлорида натрия в водопроводной воде с жесткостью 7,5 мг-экв/дм^3 и концентрацией хлоридов 1500 мг/дм^3) и анодную – с раствором щелочи концентрацией
1 г-экв/дм^3. Предполагалось, что при проведении электролиза за счет повышения pH в катодной области будет происходить умягчение воды. В свою очередь, связывание гидроксил-аниона по реакциям (1) и (2) в катодной области возможно будет препятствовать значительному повышению pH раствора:

$$Ca(HCO_3)_2 + 2OH^- \rightarrow CaCO_3\downarrow + CO_3^{2-} + 2H_2O, \quad (1)$$

$$MgCl_2 + 2OH^- \rightarrow Mg(OH)_2\downarrow + 2Cl^-. \quad (2)$$

Использование раствора щелочи в анодной области должно было обеспечить эффективное связывание активного хлора в виде гипохлорита

натрия. Результаты данных исследований приведены на рисунках 1, 2 и в таблицах 1, 2.

Как видно из данных рисунков и таблиц, при электролизе водного раствора, содержащего хлориды, концентрация последних снижается с 1500 мг/дм^3 до 70,00–160,00 мг/дм^3. Значение остаточных концентраций хлора зависит от времени электролиза. Скорость процесса возрастает с увеличением анодной плотности тока. Так, при увеличении плотности тока с 4,44 А/дм^2 до 8,88 А/дм^2 время электролиза сокращается с 4 до 1,5 ч, концентрация хлоридов снижается до 130,0–160,0 мг/дм^3.

При увеличении времени процесса можно достичь более низких концентраций хлоридов в воде. Однако при этом происходит существенное снижение выхода по току. В целом, процесс очистки происходит эффективно, и степень очистки от хлоридов достигает 90–95 % (рис. 2).

При проведении электролиза отмечено повышение pH рабочего раствора. Уровень pH растет с повышением анодной плотности тока и увеличением времени электролиза. При плотности тока 4,44 А/дм^2 pH достигает 12,8, а при плотности тока, равной 8,88 А/дм^2 – 14,0.

Во всех случаях отмечено снижение жесткости воды (Ж) до уровня 0,4 (j=4,44 А/дм^2) – 2,0 мг-экв/дм^3 (j=6,66, 8,88 А/дм^2).

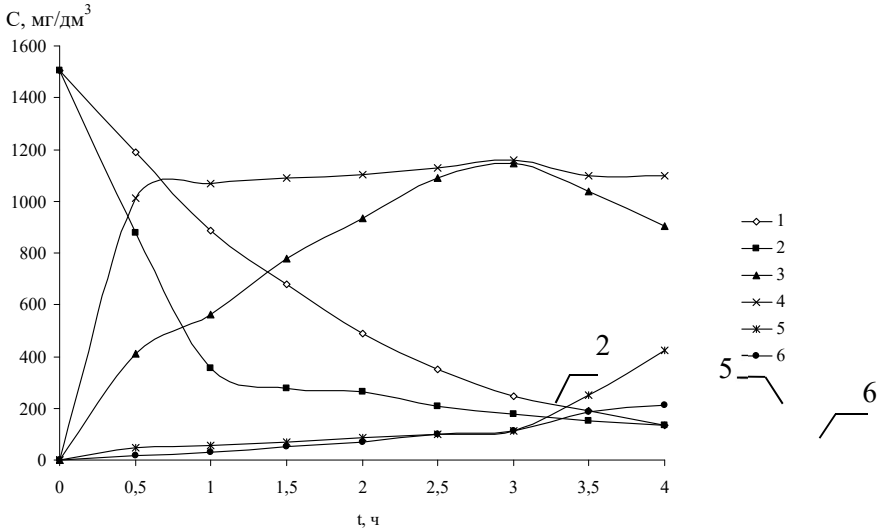


Рис. 1. Зависимость концентрации хлоридов в катодной и в анодной области, активного хлора в анодной области от времени электролиза раствора хлорида натрия в водопроводной воде ([Cl^-]=1500 мг/дм^3, Ж=7,5 мг-экв/дм^3) в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41): 1; 2 – [Cl^-] (катодная область); 3; 4 – [Cl^-] (анодная область); 5; 6 – [Cl_2]; анодная плотность тока, А/дм^2: 4,44 – 1; 3; 5; 6,66 – 2; 4; 6

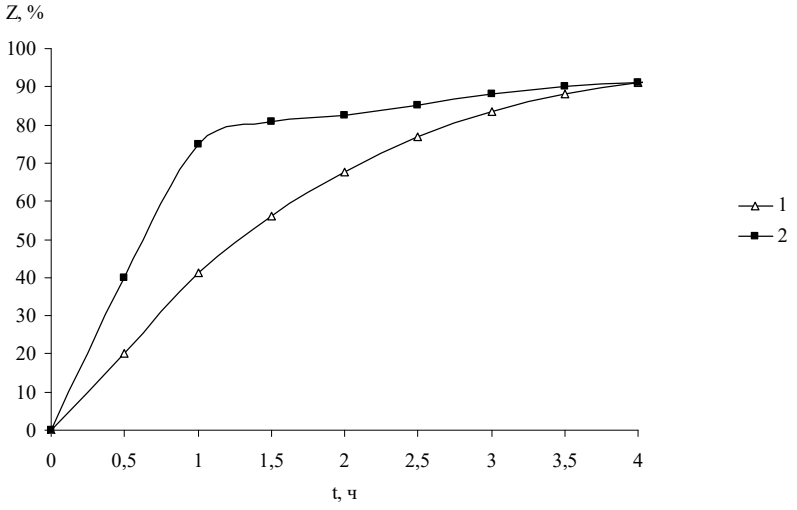


Рис. 2. Зависимость степени извлечения хлоридов (Z, %) от времени электролиза раствора хлорида натрия в водопроводной воде ([Cl^-]=1500 мг/дм^3, Ж =7,5 мг-экв/дм^3) в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41) при анодной плотности тока, А/дм^2: 4,44 (1); 6,66 (2)

Таблица 1. *Зависимость остаточного содержания хлоридов в растворе хлорида натрия в водопроводной воде от времени электролиза в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41, j=6,66 А/дм²; Щ$_А$=1 г-экв/дм³)*

t, ч	Катодная область			Анодная область		Z (Cl^-), %
	pH	[Cl^-], мг/дм³	Ж, мг-экв/дм³	[Cl_2], мг/дм³	[Cl^-], мг/дм³	
нач.	7,8	1506,60	7,5	0,00	0,00	-
1	10,8	354,50	-	28,36	1067,14	76,47
2	11,8	265,88	-	70,90	1104,11	82,35
3	12,8	177,25	-	113,44	1159,26	88,24
4	12,8	132,94	-	212,70	1098,95	91,18
5	13,0	70,90	2,0	311,96	1057,14	95,29

Таблица 2. *Зависимость остаточного содержания хлоридов в растворе хлорида натрия в водопроводной воде от времени электролиза в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41, j=8,88 А/дм², Щ$_А$=1 г-экв/дм³)*

t, ч	Катодная область			Анодная область		Z (Cl^-), %
	pH	[Cl^-], мг/дм³	Ж, мг-экв/дм³	[Cl_2], мг/дм³	[Cl^-], мг/дм³	
нач.	7,8	1506,60	7,5	0,00	0,00	-
0,5	14,0	709,00	-	50,30	746,70	52,94
1,0	14,0	443,13	-	206,69	855,20	70,59
1,5	14,0	159,53	2,0	363,08	1081,22	89,41

Поскольку уровень pH во всех случаях превышает необходимые значения для эффективного умягчения воды (pH=11,0), то на эффективность умягчения этих процессов вероятно влияет не уровень pH, а дисперсность образовавшихся осадков карбоната кальция ($CaCO_3$) и гидрооксида магния ($Mg(OH)_2$). При образовании мелкодисперсных осадков, возможно, коллоидной степени дисперсности, эффективность отстаивания этих осадков снижается, что приводит к снижению эффективности умягчения воды.

Наиболее благоприятные условия для умягчения воды отмечены при плотности тока j=4,44 А/дм², когда отмечено снижение жесткости до 0,4 мг-экв/дм³. Такую воду допускается использовать для подпитки водогрейных котлов без дополнительного умягчения. Если судить по остаточному содержанию хлоридов и выходу по току, то наиболее благоприятные условия достигнуты при плотности тока j=6,66 А/дм².

Как видно из рис. 1, 2 и таблиц 1, 2, во всех случаях процесс электролиза протекал при весьма низких значениях выхода по току.

Обусловлено это тем, что при высоких значениях pH в катодной области значительная часть электричества переносится наряду с хлоридами – гидрооксид-анионами, что в целом приводит к значительным затратам электроэнергии на электролиз воды.

Другим важным аспектом процесса является то, что реакция окисления хлоридов на аноде протекает весьма неэффективно. В данном случае, параллельно с реакцией окисления хлоридов – реакция (3) происходит конкурирующая реакция окисления гидрооксид-анионов – реакция (4):

$$2Cl^- - 2\bar{e} \rightarrow Cl_2, \quad (3)$$

$$4OH^- - 4\bar{e} \rightarrow 2O_2 + 4H^+. \quad (4)$$

Это обусловлено высокой концентрацией щелочи в анодной области – 1 мг-экв/дм³. Снижение концентрации хлоридов в катодной области компенсируется за счет увеличения концентрации хлоридов в анодной области, где она достигает в отдельных случаях значений больших 1000 мг/дм³. Увеличение концентрации активного хлора в анодной области происходит за счет снижения концентрации щелочи вследствие электрохимического окисления гидрооксид-анионов. Вероятно, в данном случае для более полного превращения хлоридов в активный хлор необходимо снижать уровень pH в анодной области. Известно, что при pH меньше 4,0 основной реакцией будет реакция (3) с выделением активного хлора. Выделившийся из электролизера хлор можно поглощать раствором щелочи или извести в отдельной емкости с получением гипохлорита натрия или хлорной извести.

Как видно из приведенных результатов очистка воды от хлоридов в двухкамерном электролизёре сопровождается умягчением воды вследствие подщелачивания раствора в катодной области. Этот процесс является довольно интересным, так как позволяет умягчать воду при очистке от хлоридов или сульфатов.

В дальнейшем были проведены исследования с использованием как водопроводной воды (таблица 3) так и растворов сульфатсодержащих солей в воде (таблица 4). При этом в катодную область помещали рабочий раствор, в анодную – раствор серной кислоты концентрацией 52 мг-экв/дм^3. Процесс очистки от сульфатов контролировали по возрастанию кислотности анодного раствора. Результаты по электролизу водопроводной воды приведены в таблице 3.

Таблица 3. *Зависимость эффективности умягчения водопроводной воды от времени электролиза в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41, j=5,0 А/дм^2)*

t, ч	Катодная область				Анодная область	$Z_ж$, %
	Щ, мг-экв/дм^3	Ж, мг-экв/дм^3	[Mg^{2+}], мг-экв/дм^3	[Ca^{2+}], мг-экв/дм^3	К, мг-экв/дм^3	
нач.	4,0	7,8	5,7	2,1	52,0	-
1	4,0	4,1	2,1	2,0	57,2	48,7
2	5,6	2,0	2,0	0,0	62,0	74,4
4	6,0	1,0	1,0	0,0	68,0	87,1

Как видно из таблицы при электролизе в течение 1 часа жесткость воды снижалась до 4 мг-экв/дм^3, а уже через 2 часа – до 2 мг-экв/дм^3. При этом в первом случае остаточная концентрация магния составляла 2 мг-экв/дм^3, во втором – 1 мг-экв/дм^3. Можно сделать вывод, что за один час электролиза щелочность была недостаточной для гидролиза ионов магния.

За четыре часа электролиза щёлочность рабочего раствора возросла с 4,0 до 6,0 мг-экв/дм^3, что позволило существенно повысить эффективность умягчения воды.

Очевидно, что эффективность умягчения воды в двухкамерном электролизёре зависит от содержания анионов в воде. При повышении содержания хлоридов и сульфатов в воде, уровень щёлочности в катодной области растёт пропорционально содержанию анионов и времени электролиза, что способствует эффективному умягчению воды (таблица 4).

Таблица 4. *Влияние времени электролиза раствора сульфата натрия в водопроводной воде в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41) на эффективность умягчения (j=5,0 А/дм^2)*

t, ч	Катодная область					Анодная область	$Z_ж$, %
	Щ, мг-экв/дм^3	Ж, мг-экв/дм^3	[Mg^{2+}], мг-экв/дм^3	[Ca^{2+}], мг-экв/дм^3	[SO_4^{2-}], мг/дм^3	К, мг-экв/дм^3	
нач.	4,0	7,8	5,7	2,1	84,0	52,0	-
0,5	4,1	5,2	4,1	1,1	70,0	55,0	33,3
1,0	4,5	2,3	2,1	0,2	52,8	59,4	70,5
1,5	5,4	1,0	2,0	0,0	34,6	67,3	87,2
2,0	6,5	0,9	0,9	0,0	5,6	70,5	88,5

В данном случае уже за два часа практически полностью удаляются сульфаты, а остаточная жесткость снижается до 0,9 мг-экв/дм^3.

Следует отметить, что в данном случае, как и в случае умягчения водопроводной воды, довольно сложно поддерживать заданную плотность тока. Дело в том, что в процессе электролиза в присутствии ионов жесткости на катоде образуется плёнка из продуктов гидролиза магния и кальция, являющаяся диффузионным барьером, что существенно повышает электросопротивление электролизёра и значительно снижает выход по току как серной кислоты в анодной области, так и щелочи в катодной области.

О влиянии ионов жесткости на процесс электролиза в водопроводной воде можно судить по данным, приведённым в таблице 5.

Как видно из таблицы 5 очистка воды от хлоридов и сульфатов происходит довольно эффективно.

Однако, не смотря на довольно высокое содержание хлоридов и сульфатов в воде, сопротивление электролизёра со временем электролиза сильно возрастает.

При напряжении 20 В сила тока за семь часов снижается с 0,0060 А до 0,0001 А, при этом сила тока падает значительно быстрее, чем снижается концентрация катионов и анионов в ка-

тодном растворе. Это подтверждает предположение о том, что лимитирующей стадией процесса становится диффузия воды к поверхности катода и диффузия гидроксид-анионов от катода в раствор.

Таблица 5. *Зависимость остаточного содержания хлоридов и сульфатов в водопроводной воде, остаточной жесткости и щелочности от времени электролиза раствора в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41, U=20 В)*

t, ч	I, А	Катодная область						Анодная область	Z (SO_4^{2-}), %
		Щ, мг-экв/дм^3	Ж, 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	К, мг-экв/ дм^3	
нач	–	5,0	7,7	5,50	2,20	170,00	280,32	50	–
1	0,0060	5,0	6,0	4,50	1,50	159,52	202,11	50	28
2	0,0010	5,0	3,6	2,20	1,40	70,90	179,26	50	36
3	0,0005	5,0	2,5	1,50	1,00	35,45	173,99	50	38
4	0,0003	5,0	2,0	1,00	1,00	31,02	149,38	52	47
5	0,0002	5,0	1,7	0,80	0,90	26,59	40,42	54	85
6	0,0001	5,0	1,0	0,37	0,62	17,72	14,06	56	95
7	0,0001	5,0	0,6	0,30	0,30	0,00	14,06	56	95

Главной проблемой в данном случае является не потеря энергии, а снижение скорости процесса. Ведь при очень низких значениях силы тока расход энергии на электролиз небольшой.

А при напряжении 20 В существенного разогрева раствора также не наблюдается. Однако время процесса при этом возрастает значительно.

Если обратить внимание на зависимость характеристик воды от времени электролиза, то следует сказать, что степень умягчения воды при этом достигает 95 % при остаточной жесткости воды 0,6 мг-экв/дм3 и стабильной щелочности на уровне 5 мг-экв/дм3.

Щелочность воды в данном случае обусловлена наличием ионов натрия в воде. Концентрация сульфатов в процессе электролиза снижается до 14,06 мг/дм3, а хлориды удаляются полностью. Увеличение кислотности в анодной области происходит на 6 мг-экв/дм3, что эквивалентно содержанию сульфатов в воде.

В целом, проведенные в дальнейшем исследования показали, что кислотность в анодной области может подниматься до 1500–2000 мг-экв/дм3. Высокие результаты по очистке воды в данном случае обусловлены и тем, что содержание сульфатов и хлоридов в воде эквивалентно её жесткости.

Так как процесс электролиза солевых растворов в двухкамерном электролизере сопровождается подщелачиванием католита, то очевидно, что данные электролизеры целесообразно использовать при наличии в катодной области ионов жесткости. Эти ионы при гидролизе или при переходе из бикарбонатов в карбонаты связывают гидроксил-анионы, чем способствуют снижению щелочности в катодной области. Очевидно, что при низкой щелочности гидроксил-анионы не будут снижать выход по току при транспортировании хлоридов и сульфатов через анионную мембрану. Это подтверждают результаты, приведенные на рис. 3.

Как видно из рисунка в данном случае отмечена высокая эффективность очистки воды от сульфатов при высокой степени умягчения воды. Такие результаты достигнуты в основном за счет того, что концентрация анионов была эквивалентна концентрации ионов жесткости в воде. При этом в растворе преобладали ионы магния, которые легко гидролизуются при повышении pH среды.

Подобные результаты получены и при электролизе раствора сульфата магния и хлорида кальция в водопроводной воде (таблица 6). В данном случае, как и при электролизе водопроводной воды с более низким содержанием хлоридов и сульфатов (таблица 5) с течением времени отмечено значительное снижение силы тока при напряжении 20 В. Однако и в данном случае отмечена высокая эффективность очистки воды от хлоридов и сульфатов при степени умягчения воды на уровне 97 % (остаточная жесткость воды 0,2 мг-экв/дм^3). Хлориды из воды удалены полностью, а степень очистки воды от сульфатов достигла 94,5 %. Кислотность в анодной области достигла 72 мг-экв/дм^3. Это обусловлено тем, что в кислой среде хлориды были удалены из раствора в виде молекулярного хлора.

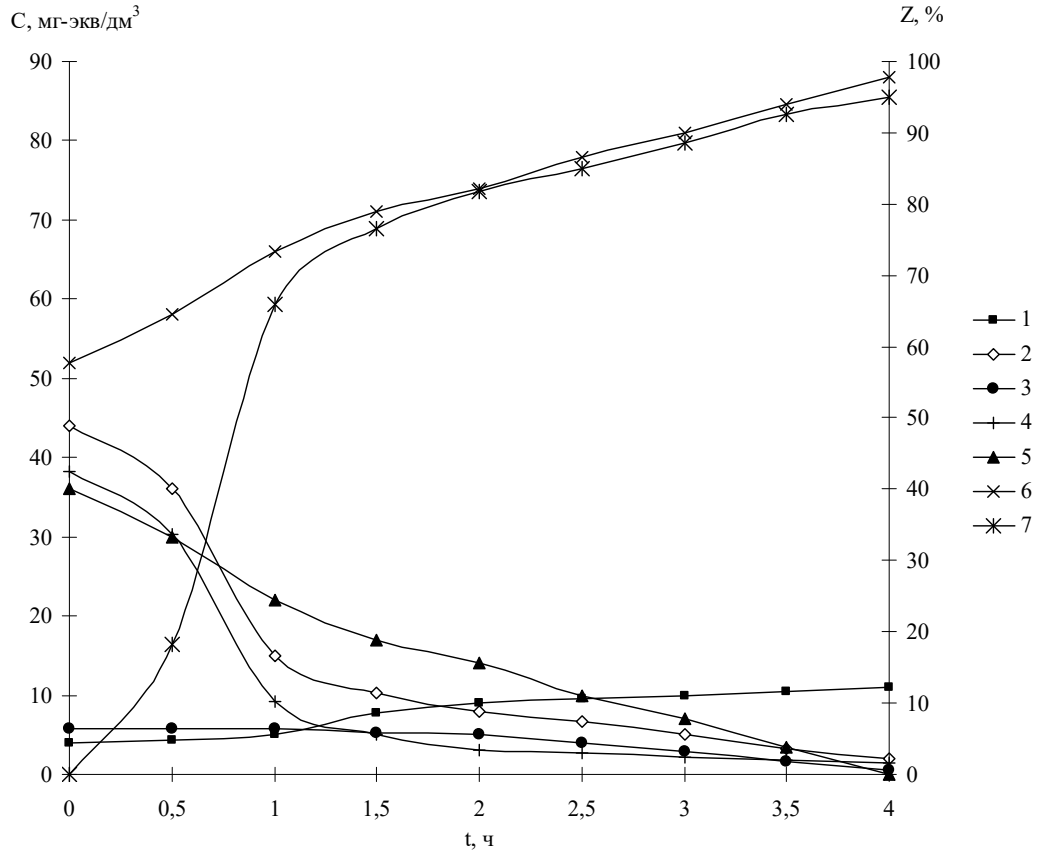


Рис. 3. Зависимость щелочности (1), жесткости (2), концентрации кальция (3), магния (4), сульфатов (5) раствора сульфата магния в водопроводной воде (Щ=4,0 мг-экв/дм^3; Ж=44,1 мг-экв/дм^3, [Ca^{2+}]=5,8 мг-экв/дм^3,[Mg^{2+}]=38,2 мг-экв/дм^3, [Cl^-]=450 мг/дм^3, [SO_4^{2-}]=36,0 мг-экв/дм^3), кислотности в анодной области (6) и степени умягчения раствора (Z) (7) от времени электролиза в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41, U=20 В).

Таблица 6. *Влияние времени электролиза раствора хлорида кальция и сульфата магния в водопроводной воде на эффективность его деминерализации (мембрана МА-41, U=20 В)*

t, ч	I, А	Катодная область						Анодная область	Z (SO_4^{2-}), %	B (SO_4^{2-}), %
		Щ, мг-экв/дм^3	Ж, 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	К, мг-экв/дм^3		
нач	-	5	20,0	10,0	10,0	450,00	966,61	50,0	-	-
1	0,0175	8	10,0	10,0	0,0	106,35	760,98	62,4	21,30	65,61
2	0,0175	8	5,0	5,0	0,0	75,96	582,60	67,0	39,75	56,91
3	0,0175	8	1,6	1,6	0,0	70,90	483,30	68,1	50,02	31,68
4	0,0175	8	1,0	1,0	0,0	53,17	423,55	68,0	56,20	19,06
5	0,0175	8	0,7	0,7	0,0	0,00	371,70	69,1	61,56	16,54
6	0,0100	8	0,4	0,4	0,0	0,00	330,40	70,3	65,83	23,06
7	0,0100	8	0,2	0,2	0,0	0,00	228,47	70,5	76,37	56,91
8	0,0070	8	0,2	0,2	0,0	0,00	156,41	71,2	83,82	57,47
9	0,0025	8	0,2	0,2	0,0	0,00	149,38	71,6	84,55	15,70
10	0,0020	8	0,2	0,2	0,0	0,00	130,93	72,0	86,46	51,52
11	0,0020	8	0,2	0,2	0,0	0,00	96,66	72,0	90,00	95,67
12	0,0020	8	0,2	0,2	0,0	0,00	84,36	72,0	91,28	34,34
13	0,0020	8	0,2	0,2	0,0	0,00	52,72	72,0	94,55	88,32

В случае, когда концентрация хлоридов или сульфатов или их суммарное содержание в воде значительно превышает жесткость воды, процесс сопровождается значительным повышением щелочности раствора в катодной области при существенном снижении эффективности очистки воды из-за конкурирующего влияния гидрооксид-анионов при диффузии анионов через анионную мембрану. Это подтверждают результаты, приведенные на рис. 4 и в таблице 7.

Как видно из рисунка, за 9 ч электролиза степень очистки воды от сульфатов не превысила 70 %. При этом выход по току кислоты в анодной области колебался в пределах 5–19 %, что обусловлено значительными потерями энергии на электролиз воды вследствие диффузии гидрооксид-анионов в анодную область.

Очевидно, что в данном случае целесообразно использовать трехкамерные электролизеры.

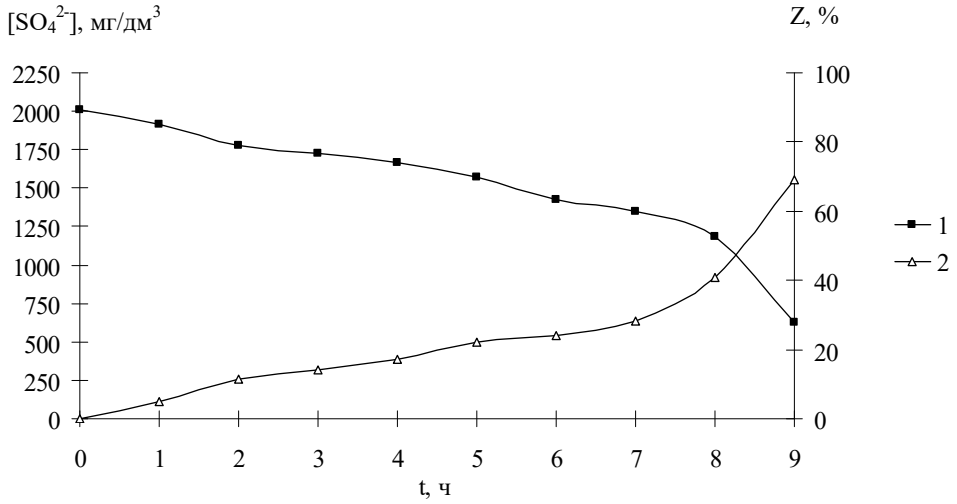


Рис. 4. Зависимость остаточной концентрации сульфатов (1) в модельном растворе сульфата натрия в водопроводной воде ([SO_4^{2-}]=2010 мг/дм^3) и степень извлечения сульфатов (Z) (2) от времени электролиза в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41, j=5 А/дм^2)

Таблица 7. *Зависимость выхода по току сульфатов, изменения щелочности от времени электролиза раствора сульфата натрия в водопроводной воде в двухкамерном электролизере (мембрана МА-41, j=5 А/дм^2)*

t, ч	Катодная область		Анодная область	Z (SO_4^{2-}), %	B (SO_4^{2-}), %
	Щ, мг-экв/дм^3	[SO_4^{2-}], мг/дм^3	К, мг-экв/дм^3		
нач.	52,0	2010	16,00	-	-
1	6,04	1912	18,02	4,8	10,6
2	8,83	1778	20,83	11,5	12,3
3	9,91	1726	21,91	14,1	4,9
4	11,24	1662	23,24	17,3	5,74
5	13,20	1568	25,20	22,0	8,65
6	16,16	1426	28,16	24,0	13,07
7	17,83	1346	29,82	28,1	7,33
8	21,16	1186	33,15	41,0	14,67
9	32,83	626	44,82	68,9	19,71

Заключение

1. Изучены процессы электрохимического извлечения хлоридов из водных растворов в двухкамерном электролизере. Показано, что при выделении хлоридов в двухкамерном электролизере наряду с выделением хлора происходит эффективное умягчение воды, при этом pH увеличивается до 10,0–12,8. Хлорид-ионы концентрируются в анодной области. Превращение хлоридов в активный хлор улучшается при уменьшении pH в анодной области.

2. Изучены процессы электрохимического выделения сульфатов из водопроводной воды в

двухкамерном электролизере (мембрана МА-41). Степень извлечения сульфатов в зависимости от времени процесса достигает 69–90 %.

3. Установлено, что при электролизе водопроводной воды наряду с выделением сульфатов происходит умягчение воды. Жесткость воды при электролизе снижается до 1 мг-экв/дм^3. Эффективность умягчения возрастает с увеличением времени электролиза и концентрации сульфата натрия.

Список литературы

1. Карелин В.А. Водоподготовка. Физико-химические основы процессов обработки воды: учебное пособие / Карелин В.А. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. – 97 с.
2. Кучерик Г.В. Ионообменное выделение хлоридов и сульфатов из шахтных вод / Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук, Н.Д. Гомеля // Збірнік наукових праць СНУЯЕтаП. – 2012. – Т. 1, № 41. – С. 138–143.
3. Keizer K. // Membrane Separation Technology, Principles and Application / K. Keizer, J.R. Uhlholm, T.J .Burggraaf // Amsterdam: Elsevier. – 1995. – pp. 157–199.
4. Юрчевский Е.Б. Перспективы использования мембранных технологий водоподготовки для предотвращения загрязнения пароводяных трактов ТЭС органическими примесями природной воды / Е.Б. Юрчевский, А.Г. Первов, А.П. Андрианов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 8. – С. 2–9.
5. Кучерик Г.В. Использование электролиза для выделения хлоридов и сульфатов из щелочных регенерационных растворов / Г.В. Кучерик, Ю.А. Омельчук, Н.Д. Гомеля // Екологічна безпека. – 2012. – Т. 1, № 13. – С. 68–73.
6. Писарска Б. Анализ условий получения H_2SO_4 и NaOH из растворов сульфата натрия методом электродиализа / Б. Писарска, Р. Дылевски // Ж. прикл. химии. – 2005. – Т. 78, № 8. – С. 1311–1316.
7. Гарбуз С. А. Выпаривание как метод концентрирования. Проблемы, пути развития / С.А. Гарбуз // Наука, образование и культура. – 2016. - № 1 (4). – С. 4-6.

References

1. Karelin V.A. *Vodopodgotovka. Fiziko-himicheskie osnovy processov obrabotki vody: uchebnoe posobie* [Water preparation. Physical and chemical bases of water treatment processes]. Tomsk, Izd-vo Tomskogo politekhni-cheskogo universiteta, 2012, 97 p.
2. Kucherik G.V., Omel'chuk Yu.A., Gomelya N.D. Ion exchange separation of chlorides and sulphates from mine waters. *Zbirnik naukovih prac' SNUYaE-taP,* 2012, Vol. 1, No. 41, pp. 138–143.
3. Keizer K. Membrane Separation Technology, Principles and Application. Amsterdam: Elsevier, 1995, pp. 157–199.
4. Yurchevskij E.B., Pervov A.G., Andrianov A.P. Prospects for the use of membrane water treatment technologies to prevent contamination of steam and water paths of thermal power plants with organic impurities of natural water. *Teploenergetika*. 2006, No. 8, pp. 2–9.
5. Kucherik G.V., Omel'chuk Yu.A., Gomelya N.D. Use of electrolysis to separate chlorides and sulfates from alkaline regeneration solutions. *Ekologichna bezpeka*, 2012, Vol. 1, No. 13, pp. 68–73.
6. Pisarska B., Dylevski R.Analysis of conditions for obtaining H_2SO_4 and NaOH from sodium sulfate solutions by electrodialysis. *Zh. prikl. Himii,* 2005, Vol. 78, No. 8, pp. 1311–1316.
7. Garbuz S.A. Evaporation as a method of concentration. Problems, development paths. *Nauka, obrazovanie i kul'tura.* 2016, No. 1 (4), pp. 4-6.

ISSN 2413-5526

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 5 № 4

SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 5 No 4

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

Адрес редколлегии:
ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация
E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru
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 20.12.2019. Изд. № 53/19. Зак. 51/19. Тираж 65 экз.
Объем 21,5 п.л. Усл. печ. л. 19,99. Уч.-изд. л. 21,07. Формат бумаги 60 х 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»