

ISSN 2413-5526

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ

Научный журнал

Т. 3 № 2

**Севастополь
2017**

Э 651 Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2017. – Т. 3. - № 2. – 84 с.: ил.

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

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

Редакционная коллегия:

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

Учредитель и издатель:

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

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

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

Свидетельство ПИ № ФС 77 – 64120 от 25.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Тепловые и ядерные энергетические установки	5
<i>Качур С.А.</i> Квантование эволюции Вселенной на основе модели пространственно – временного монополя космического реактора	5
<i>Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Софийский И.Ю., Пухлий К.В.</i> Расчет НДС лопаток осевых компрессоров воздушных турбохолодильных машин	15
Автоматизация процессов контроля и управления	27
<i>Дикусар Ю.Г., Сулейменова М.Б., Богушева В.Д., Вольнова А.В.</i> Исследование абсолютной устойчивости нелинейных аналоговых систем автоматического регулирования	27
<i>Качур С.А., Шахова Н.В., Халина А.А.,</i> Модель функционирования системы наведения перегрузочных машин АЭС на основе сетей Петри	35
<i>Кузнецова Н.И., Серова – Нашева Н.В., Нурзай В.А.</i> Влияние информационных и управляющих систем на безопасность атомных электростанций	41
Электротехнические комплексы и системы	48
<i>Канов Л. Н.</i> Математическое моделирование распределенного электропривода транспортных средств	48
Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии	54
<i>Качур С.А.</i> Модель движения объекта в искривленном пространстве атмосферы естественного ядерного реактора Земли	54
<i>Кувшинов В.В.</i> Изменение мощностных характеристик фотоэлектрических установок при различных климатических факторах	61
<i>Мазитов В.О., Горпинченко А.В.</i> Возможности улучшения эффективности утилизации отработанных солнечных панелей	67
Экологическая безопасность	72
<i>Пухлий В.А., Журавлев А.А., Пухлий К.В.</i> К вопросу очистки газовых выбросов от сероводорода, сероуглерода и сернистого ангидрида	72
Для авторов	82

CONTENTS

Thermal and nuclear power plant	5
<i>Kachur S.A.</i> Quantum of evolution of Universe on the basis of model of spatio-temporal monopole of space reactor	5
<i>Pukhliy V.A., Miroshnichenko S.T., Sofijskiy I.J., Pukhliy K.V.</i> Calculation stress-strain state of blades axial compressors of air turborefrigerators machines	15
Process automation and control	27
<i>Dikusar Ju.G., Suleimenova M.B., Bogusheva V.D., Volnova A.V.</i> Research of the absolute stability of nonlinear analogautomatic control systems	27
<i>Kachur S.A., Shahova N.V., Halina A.A.</i> Functioning Model of the Aiming System of Shifting Machines of APP on the basis of the Petry Nets	35
<i>Kuznetsova N.I., Serova-Nasheva N.V., Nurzai V.A.</i> Influence of information and control systems on Nuclear Power Plants safety	41
Electrotechnical complexes and systems	48
<i>Kanov L. N., Solodkiy A.V.</i> Mathematical Modelling up-diffused Electric-drive of Transport Vehicles	48
Alternative and renewable energy sources	54
<i>Kachur S.A.</i> Movement Model of Object in the Curved Space of Atmosphere of Natural Nuclear Reactor of Earth	54
<i>Kuvshinov V.V.</i> Variation in the power characteristics of photovoltaic plants under different climatic factors	61
<i>Mazitov V.O., Gorpichenko A.V.</i> Opportunities to improve the efficiency of disposal of used solar panels	67
Environmental safety	72
<i>Pukhliy V.A., Zhuravlev A.A., Pukhly K.V.</i> To a question of clearing of gas emissions from hydrogen sulphide, sulphur carbon and sulphurous anhydride	72
For cars	82

ТЕПЛОВЫЕ И ЯДЕРНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

УДК 621.039.56

Квантование эволюции Вселенной на основе модели пространственно-временного монополя космического реактора

С.А. Качур

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

Статья поступила 14.03.2017 г.; после доработки 16.03.2017 г.

Аннотация

Предложена космологическая модель на базе рассмотрения процессов функционирования пространственно-временного монополя космического реактора в рамках космического супермонополя. Выдвинута гипотеза о бесконечности существования космического супермонополя. В рамках этой гипотезы определено назначение космического реактора как системы обеспечивающей существование космического супермонополя посредством преобразования энергии и материи. Определены стадии эволюции Вселенной в одном цикле преобразования энергии. Разработана модель структуры Вселенной для различных стадий эволюции, каждая из которых характеризуется наибольшим порядком гармоник в спектре энергораспределения космического реактора.

Ключевые слова: космологическая модель, космический реактор, пространственно-временной монополь, энерговыделение, осциллирующая Вселенная, квантование эволюции Вселенной.

Quantum of evolution of Universe on the basis of model of spatio-temporal monopole of space reactor

S.A. Kachur

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

Received 14.03.2017 y.; received in final form 16.03.2017 y.

Abstract

A cosmological model on the base of consideration of processes of functioning of spatio-temporal monopole of space reactor within the framework of space supermonopole is offered. A hypothesis about endlessness of existence of space supermonopole is pulled out. Within the framework of this hypothesis, setting of space reactor is certain as the systems of providing existence of space supermonopole by means of transformation energies and matters. The stages of evolution of Universe in one loop of transformation of energy are certain. The model of structure of Universe for different stages of evolution is developed, each of which is characterized by most order of accord in the spectrum of energy-release of space reactor.

Keywords: cosmological model, space reactor, spatio-temporal monopole, energy-release, oscillatory Universe, quantum of evolution of Universe.

Введение

В настоящее время существует целый ряд хорошо известных космологических моделей [1-8],

однако ни одна из них не дает исчерпывающего ответа о строении и эволюции Вселенной. В частности, представление о статической, неизменной Вселенной не согласуется с действительностью.

Не соответствует действительности и стационарная Вселенная, в которой хаббловское расширение компенсируется рождением вещества. Относительно нашей Вселенной еще точно не известно, является ли она открытой или замкнутой. Открытым является вопросом о форме Вселенной.

Существует проблема определения трехмерной топологии пространственного сечения Вселенной, т. е. такой фигуры, которая наилучшим образом представляет пространственный аспект Вселенной.

Предлагаемое исследование является попыткой ответить на эти вопросы. В работе дается новое представление о структуре и эволюции Вселенной как порождения пространственно-временного монополя космического реактора. Это позволяет по-новому определить квантование эволюции для осциллирующей Вселенной.

Квантование эволюции Вселенной как целого – такова конечная цель теории сверхпространства Дж. Уилера и его последователей [1, 2]. Особенность квантовой задачи состоит в том, что в принципе возможен переход от коллапса к космологическому расширению. Однако в задаче ОТО коллапс однородного мира неизбежно приводит к бесконечной плотности, объем мира обращается в нуль.

В осциллирующей Вселенной [1] предполагается, что коллапс Вселенной как целого может в сингулярном состоянии изменить знак, превратиться в антиколлапс, т. е. смениться расширением из сингулярного состояния, стать началом следующего цикла, повторяющего предыдущий.

Для того чтобы расширение (переживаемое в настоящее время) сменилось сжатием, необходимо, чтобы во Вселенной плотность была больше критической. Вопрос о возможности перехода коллапс-антиколлапс в сингулярности в настоящее время остается открытым.

Как показал в 1934г. Толмен, расчет приводит к циклам, удлиняющимся по времени и с растущей амплитудой, с увеличивающимся максимальным радиусом Вселенной. В осциллирующей модели все время растет амплитуда колебаний. Расчет изменения амплитуды в каждом цикле зависит от изменения энтропии, т. е. от конкретных процессов. С ростом энтропии растет радиус остановки.

В горячей модели Вселенной есть одна особенность, благоприятная для осциллирующей модели. Каким бы ни был химический состав вещества, подвергающегося коллапсу, после прохождения через «огненную печь» сингуляр-

ности вещество возвращается к первоначальному составу.

Предлагаемая концепция пространственно-временного монополя космического реактора позволяет, с одной стороны, описать процессы сжатия Вселенной внутри ее расширения и таким образом разрешить противоречия теории осциллирующей Вселенной.

Возрастание энергии, вызванное ядерными реакциями, приводит к развитию волновых процессов в распределении энергии и, как следствие, деформации пространства с последующим локальным сжатием в момент глобального расширения.

С другой стороны, связать квантование эволюции Вселенной с цикличностью процесса сжатия-расширения, порождаемого дискретным во времени появлением гармоник более высокого порядка в энерговыделении космического реактора.

Система космического реактора является открытой. Ее назначение – преобразование энергии для суперсистемы, которая рассматривается далее как замкнутая система.

Подробное описание монополя космического реактора приведено в [9-11]. Предлагаемая статья является развитием нового взгляда на пространственно-временные эффекты ядерных реакторов и естественных реакторов [12-18].

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – создание космологической модели квантовой эволюции Вселенной как порождения цикла существования пространственно-временного монополя космического реактора в рамках замкнутой системы космического супермонополя.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) выявить в рамках предложенных моделей монополя космического реактора и космического супермонополя особенности структуры, определяющие цикл эволюции Вселенной;
- 2) описать механизм взаимодействия пространственно-временного монополя космического реактора и космического супермонополя;
- 3) определить принцип смены стадий эволюции Вселенной, его влияние на структуру и состав вещества Вселенной;
- 4) разработать модели формы Вселенной и форм, входящих в нее галактик, в зависимости от стадии эволюции.

Модели пространственно-временного монополя космического реактора и космического супермонополя

Для концепции монопольной структуры пространства цикличность является проявлением квантования процессов, протекающих внутри монополя как макроклетки пространства и времени. Идея построения монополя не противоречит ни идеи статической Вселенной Эйнштейна, ни удалению или сближению галактик или расширению Вселенной Фридмана, ни теории Большого Взрыва, связанной с космическим реактором Гамова, поскольку объединяет эти подходы к описанию изменения Вселенной.

Поскольку эволюция Вселенной осуществляется уже после Большого Взрыва, следовательно, после взрыва существует цикл работы космического реактора как критического. Появление в энерговыделении космического реактора гармоник высших порядков приводит реактор к надкритическому состоянию с последующим взрывом. Промежуток времени между взрывами определяет один цикл квантовой эволюции Вселенной и существования пространственно-временного монополя космического реактора в предлагаемом ниже виде. Появление монополя космического реактора – это следствие останова взрывающегося реактора мощным внешним электромагнитным воздействием. Космический реактор является импульсным реактором, управляемым извне.

Рассмотрим монополь космического реактора в горизонтальном и вертикальном сечениях (рис. 1).

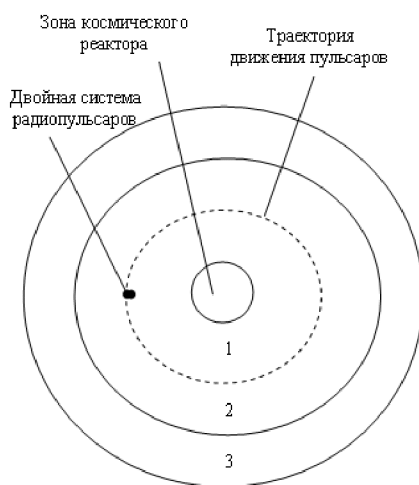


Рис. 1. Структура пространственно-временного монополя космического реактора при горизонтальном сечении: 1 – область сжатия, 2 – область задержки, 3 – область расширения.

В горизонтальном сечении структура этого монополя аналогична структуре монополя ядерного реактора, то есть имеется область коллапса, определенная Большим взрывом, область сжатия, которая интерпретируется как черная дыра Вселенной, область задержки времени, связанная с системой пульсаров, и область космического расширения.

Поскольку появление монополя ядерного реактора происходит на грани ядерного взрыва (без взрыва), то по вертикали ширина такого монополя не превышает радиуса области сжатия.

Вертикальное сечение монополя космического реактора приведено на рис. 2. Такое представление структуры монополя позволяет объяснить мгновенные переходы из одного искривленного пространства в другое в рамках одной зоны монополя.

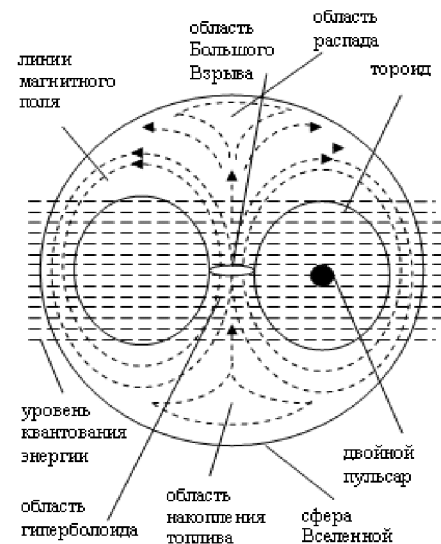


Рис. 2. Структура пространственно-временного монополя космического реактора при вертикальном сечении

Монополь космического реактора находится в области задержки космического супермонополя, модель которого приведена на рис. 3. Супермонополь является замкнутой системой с неизменными границами.

Теория космического реактора, предложенная Гамовым, не рассматривает возможность и необходимость управления естественным ядерным реактором, каким являлась ранняя Вселенная. Вообще теория расширяющейся в бесконечности Вселенной и не могла допустить какой-либо статичности, поскольку цель управления – сохранение равновесного состояния объекта управления. Взаимодействие системы физических объектов и их полей можно также рассматривать как саморегулирование, если любые изменения параметров си-

системы являются флуктуациями. В идеале саморегулирование определяет вечность существования системы и, следовательно, бесконечность процесса ее преобразования.

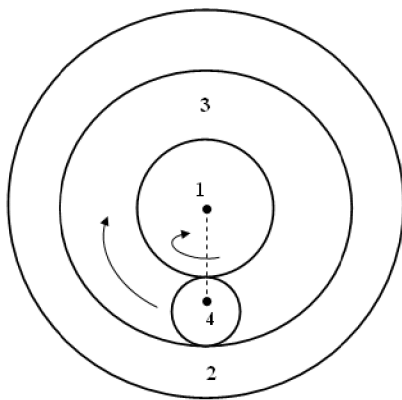


Рис. 3. Модель космического супермонополя:

- 1 – область сжатия (светящаяся материя);
- 2 – область расширения (темная материя);
- 3 – область задержки (вакуум); 4 – монополярный космический реактор.

Создание монополя космического реактора и период его существования определяется частотой внешнего запускающего излучения космического супермонополя. Носителем этого излучения является светящаяся материя. Космический реактор является открытой системой для поступления темной материи с последующим отводом вакуума. Преобразование материи в вакуум происходит посредством взрыва в процессе квантованной эволюции Вселенной. Объем материи отдаваемый во внешнюю сферу и объем получаемый извне постоянны, поскольку скорость движения монополя космического реактора относительно центра супермонополя (рис. 3) постоянна и равна скорости света.

Соответственно задача саморегулирования для монополя космического реактора заключается в соблюдении баланса материи и вакуума внутри монополя посредством управления, порождаемого светящейся материей.

Представляется, что назначение системы космического реактора состоит в поддержании необходимого размера области задержки супермонополя, которая разделяет области темной и светящейся материи, для сохранения существования самого сверхмонополя.

Выдвигается следующая гипотеза бесконечного существования космического супермонополя. Вакуум области задержки супермонополя на границе с областью расширения образует слой взаимного проникновения вещества (некое подобие p - n

переходов в полупроводниковых приборах). В результате диффузии, вызванной гравитацией, происходит выделение энергии вакуума, которая деформирует пространство запирающего пограничного слоя. Причем, в вакуум проникает темная материя, в то время как светящаяся материя с вакуумом не взаимодействует.

На границе области расширения вакуум преобразуется в темную материю. Уменьшение количества вакуума приводит к усилению сжатия светящейся материи. Часть светящейся материи под действием силы дополнительного сжатия направляется в сферу космического реактора. Полученная в переходе (пограничном слое) темная материя в полном объеме поступает в космический реактор и в сжатом в области реактора состоянии порождает Большой Взрыв.

Светящаяся энергия «гасит» взрыв и останавливает космический реактор, позволяя ему функционировать как подкритический. Это знаменует начало цикла преобразования темной материи в вакуум. Данный цикл определяется как дискретный процесс эволюции Вселенной. По окончании цикла на выходе системы космического реактора объем светящейся материи соответствует началу цикла, а объем полученного вакуума – объему темной материи в начале цикла. Таким образом, размеры областей космического супермонополя остаются неизменными.

Для реализации такого механизма преобразования энергии необходимо, чтобы сфера космического реактора до начала цикла или после окончания цикла, что одно и то же, представляла собой почти пустое трехмерное пространство с минимальным количеством звездного вещества, образующего двойную систему пульсаров, которая вращается относительно центра с минимальным объемом темной материей в области космического реактора.

Предложенная гипотеза существования супермонополя совместно с космическим реактором не подразумевает возможности самозарождения, поскольку полученная на ее основе модель является описанием сложной замкнутой системы с автоматическим управлением. Этот подход не решает проблемы начальных условий.

Квантовая эволюция Вселенной

Разработанная модель структуры Вселенной на стадии эволюции N не рассматривает начального этапа, связанного с Большим Взрывом, т.е. $N > 0$. Представляется, что стадий эволюционного изменения пространственно-временного монополя Вселенной семь, и каждая из стадий ха-

рактируется наибольшим порядком гармоник в энергораспределении космического реактора в соответствии с функцией Бесселя.

Базовым элементом структуры в предлагаемой модели является темная энергия, которая рассматривается как следствие искривления пространства, создаваемого вакуумом. При таком подходе вакуум является носителем темной энергии. При постоянном количестве вакуума количество темной энергии (TE) меняется в зависимости от степени деформации пространства монополя Вселенной, которая связана с появлением более высокого порядка гармоник в энергоснабжении космического реактора на каждой последующей стадии эволюции. Представляется, что величина доли темной энергии в структуре монополя по стадиям описывается нормальным законом распределения вероятностей.

В результате имитационного моделирования были определены следующие значения параметров этого нормального распределения: математическое ожидание $m = 4,3$; среднее квадратическое отклонение $\sigma = 1,36$. Таким образом, доля темной энергии определяется по известной формуле

$$TE(N) = \frac{100}{1,36\sqrt{2\pi}} \int_1^N e^{-\frac{(t-4,3)^2}{2 \cdot 1,36^2}} dt. \quad (1)$$

В процентном отношении состав монополя Вселенной для любой стадии эволюции может быть определен, исходя из (1) и следующих соотношений,

$$TE(N) + TM(N) + SB(N) + SZ(N) = 100, \quad (2)$$

$$TE(N) = SZ(N) \cdot KB(N), \quad KB(N) = 2^{2(N-1)}, \quad (3)$$

$$TM(N) = 2 \cdot SB(N) \cdot KG(N), \quad KG(N) = 2^{7-N}, \quad (4)$$

$$N = 1,7,$$

где N – номер стадии эволюции или гармоники функции Бесселя;

KG – максимальный коэффициент деформации формы монополя галактик;

KB – коэффициент деформации формы монополя Вселенной;

TE – доля темной энергии в составе монополя Вселенной, %;

TM – доля темной материи в составе монополей галактик Вселенной, %;

SB – доля светящейся материи в составе монополя Вселенной, %;

SZ – доля звездного вещества в составе монополя Вселенной, %.

Результаты моделирования на основании соотношений (1) - (4) приведены в таблице и на рис. 4. Данные современных исследований космоса по структуре Вселенной соответствуют пятой строке (стадии эволюции) в таблице.

Анализ полученных результатов позволил выявить зависимости для элементов структуры монополя внутри первой стадии и между элементами первой и последней (седьмой) стадий в эволюционном цикле Вселенной. Цикличность связана с импульсным характером работы космического реактора.

Таблица. Состав и форма монополя Вселенной на разных стадиях эволюции в зависимости от порядка гармоник функции Бесселя энергораспределения космического реактора.

Номер стадии эволюции Вселенной и гармоники функции Бесселя, определяющей деформацию ее монополя	Максимальный коэффициент деформации формы монополя галактик для стадии N эволюции Вселенной	Коэффициент деформации формы монополя Вселенной	Доля темной энергии в составе монополя Вселенной	Доля темной материи в составе монополей галактик Вселенной	Доля светящейся материи (межгалактический газ) в составе монополя Вселенной	Доля звездного вещества в составе монополя Вселенной
N	KG	KB	$TE, \%$	$TM, \%$	$SB, \%$	$SZ, \%$
1	2^6	$2^0 (2^{0,5})$	0.7623	97.7120	0.7634	0.7623
2	2^5	2^2	4.5402	92.8737	1.4512	1.1350
3	2^4	2^4	16.9566	79.4993	2.4844	1.0598
4	2^3	2^6	41.2707	54.6678	3.4167	0.6449
5	2^2	2^8	69.6621	26.7252	3.3406	0.2721
6	2^1	2^{10}	89.4350	8.3821	2.0955	0.0873
7	$2^0 (2^{0,5})$	2^{12}	97.6444	1.5545	0.7772	0.0238

Примечание: для случаев $N = 1$ и $N = 7$ в скобках указаны коэффициенты, используемые при расчете гравитационных эффектов внутри монополя и моделировании его деформации.

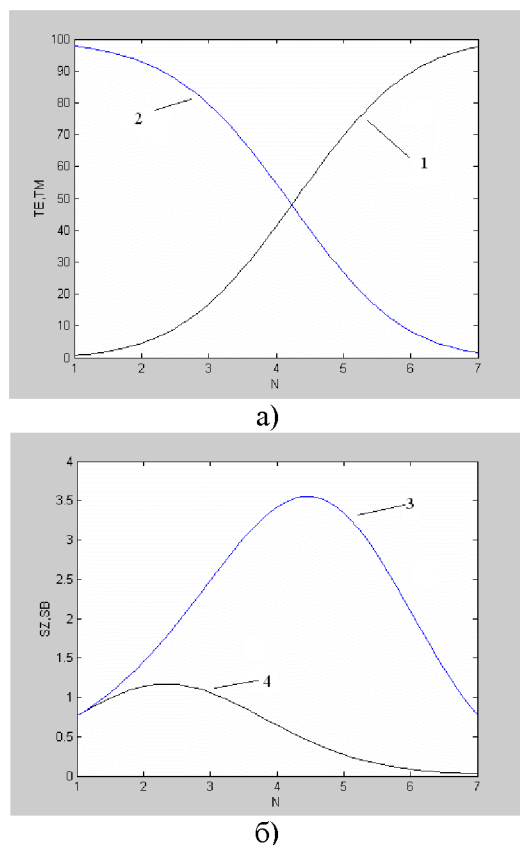


Рис. 4. Зависимость состава Вселенной от N стадии ее эволюции, которая характеризуется присутствием высших порядков (N) гармоник функции Бесселя в энерговыделении космического реактора:

1 – зависимость доли (в %) темной энергии TE от N ; 2 – зависимость доли (в %) темной материи TM от N ; 3 – зависимость доли (в %) светящейся материи SB от N ; 4 – зависимость доли (в %) звездного вещества SZ от N .

Перечислим полученные закономерности в соответствии с данными таблицы.

$$TE(1) = SZ(1) = SB(1),$$

$$TE(1) + SZ(1) = TM(7),$$

$$SB(1) = SB(7),$$

$$TE(7) = TM(1).$$

В настоящее время монополю Вселенной в соответствии с предложенной моделью находится на пятой стадии эволюции. При переходе на следующую стадию по результатам моделирования должно на треть уменьшиться суммарное количество светящейся материи и звездного вещества, т.е.

$$\frac{SZ(6) + SB(6)}{SZ(5) + SB(5)} \approx \frac{2}{3}.$$

Монополю Вселенной образуется в месте сечения верхней полусферы космического реактора (рис. 2) на уровне, соответствующем ста-

дии эволюции Вселенной. Видимая часть Вселенной определяется областью сжатия космического реактора, сечение тороида задает область задержки, за которой следует область расширения, ограничиваемая сферой космического реактора. В верхней полусфере реактора таких сечений (уровней) семь. В каждый момент времени космического реактора существует только одна Вселенная, которая, вращаясь, осуществляет переходы последовательно на все уровни, начиная с первого до окончания цикла. Вселенная имеет спиральную структуру, по аналогии со структурами галактик. Количество рукавов Вселенной определяет коэффициент KB . Переход на новый уровень сопровождается расширением видимой Вселенной и приводит к изменению коэффициента деформации формы монополя KB (табл.).

Для современной Вселенной ($N = 5$) $KB = 2^8$, что соответствует 16 рукавам спирали. Вид области сжатия монополя Вселенной в трехмерном пространстве и его проекция на плоскость с учетом координат приведены на рис. 5а и рис. 5б соответственно.

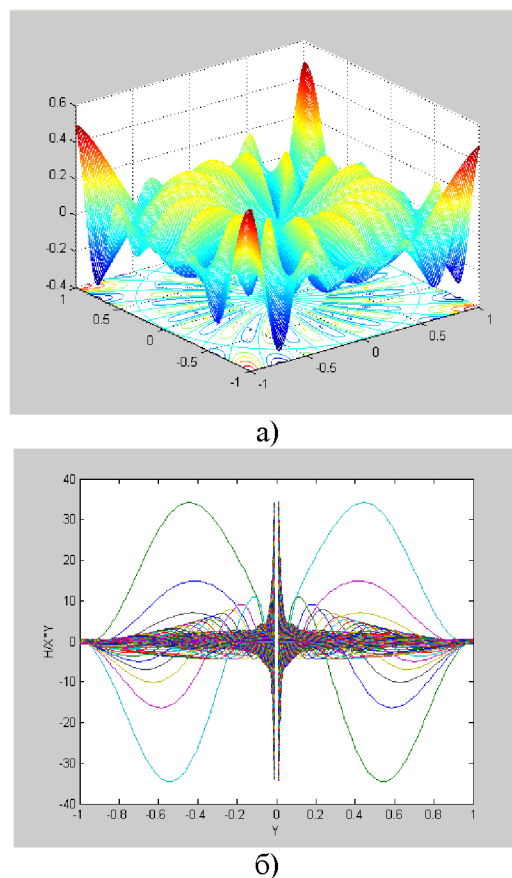


Рис. 5. Форма видимой Вселенной для $N=5$ (а) и ее проекция на вертикальную плоскость с учетом координат (б).

Евклидово пространство нашей Вселенной – это искривленное пространство космического реактора в области сжатия на пятом уровне. На других уровнях (стадиях эволюции) представление о том, что мы называем «евклидово пространство», будет иным. Соотношение между размерами областей сжатия, задержки и расширения для монополя Вселенной определяется уровнем сферы космического реактора. Это соотношение имеет место и для всех монополей галактик, звезд, планет, искусственных реакторов, относящихся к Вселенной данного уровня. Оно меняется в зависимости от уровня, и при исчезновении области задержки в монополе Вселенной происходит ее дезинтеграция, и начинается новый цикл работы космического реактора.

Монополь Вселенной порождается космическим реактором, и его эволюция определяется космическим реактором, однако, но он не является частью монополя космического реактора. Он существует параллельно монополю космического реактора так же, как и все монополи космических объектов Вселенной.

Для пространственно-временных монополей принцип пространственной вложенности структур физических объектов заменяется принципом временной параллельности. Причем, первый принцип можно рассматривать как частный случай второго.

Центром Вселенной является временная проекция космического реактора на пространство монополя Вселенной. В соответствии с моделью сферы космического реактора (рис. 2) задание скорости течения времени на каждой стадии развития Вселенной определяется степенью активности космического реактора, которая определяет скорость движения двойной системы пульсаров и, следовательно, радиус тора. Смена временных и пространственных (появление новых рукавов спиральной Вселенной) параметров является дискретным процессом.

С увеличением деформации области сжатия, которая представляется в виде гофрированной структуры (рис. 5а), возрастает содержание темной энергии во Вселенной, определяемой как энергии сжатого вакуума. При сжатии происходит разрушение, как темной материи, так и звездного вещества, энергия которых идет на деформацию пространства. Причем, в соответствии с моделью в цикле эволюции количество светящегося вещества не уменьшается относительно исходного (входного) значения.

Таким образом, можно выдвинуть следующую гипотезу. Вакуум – носитель пространства,

а светящееся вещество (материя) – носитель времени. Эти два элемента являются базовыми для монополя Вселенной.

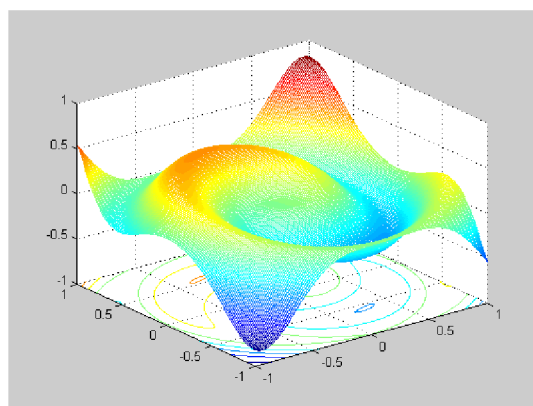
Представляется, что для монополя галактики базовыми элементами можно считать темную материю и звездное вещество, как и для монополей всех космических объектов. Ядра галактик не обладают необходимой энергией для сжатия вакуума. Вероятно, деформация формы пространства в гофрированном виде происходит из-за наличия темной материи. Видимые спирали галактики – это проекция на евклидово пространство деформации области сжатия в монополе галактики.

В связи с изложенным следует вывод: описанные в теории черных дыр пространственно-временные эффекты могут иметь место не в евклидовом пространстве Вселенной, а в монополе ядер галактик и космических объектов, которые представляют собой сверхмощные естественные ядерные реакторы.

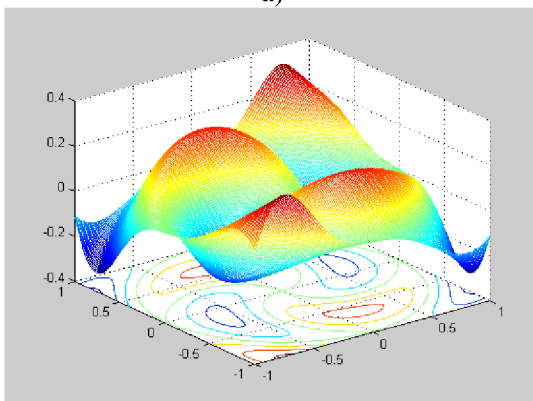
На рис. 6 представлены варианты галактической спирали в зависимости от наличия в энерговыделении естественных реакторов ядер галактик следующих гармоник функции Бесселя: первой ($N = 1$) $KG = 2^{0.5}$ – рис. 6а; второй ($N = 2$) $KG = 2^1$ – рис. 6б; третьей ($N = 3$) $KG = 2^2$ – рис. 6в. Вид проекции трехмерной формы галактики (рис. 6г) на вертикальную плоскость с учетом координат для всех вариантов одинаков, отличие состоит в величине амплитуд проекций гармоник.

В области сжатия монополя галактики гравитационная постоянная уменьшается в KG раз, а в области задержки увеличивается в KG раз, оставаясь неизменной в области расширения. Для пространственно-временных монополей Солнца, Земли и искусственных ядерных реакторов коэффициент деформации формы составляет $2^{0.5}$.

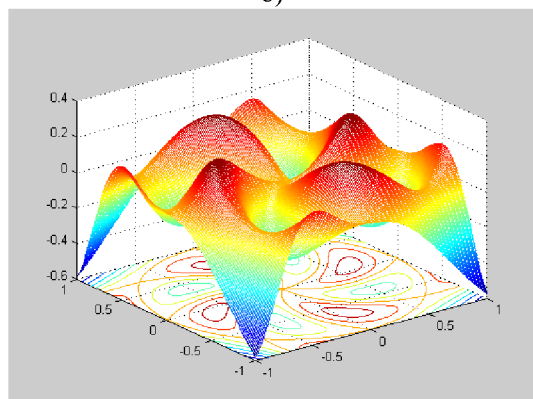
Энтропия Вселенной на стадии эволюции N определяется энтропией космического реактора, которая зависит от наличия в его энерговыделении высших гармоник функции Бесселя. В работе [14] определена связь между энтропией ядерного реактора и частотой реактивности при наличии пространственно-временного монополя. В этом случае энтропия принимает значение равное по величине времени жизни мгновенных нейтронов, выраженной в секундах. Принимая во внимание максимальную скорость протекания физических процессов (c – скорость света), определяем максимальный коэффициент усиления реактора равным $3 \cdot 10^8$, который задает значение времени жизни мгновенных нейтронов.



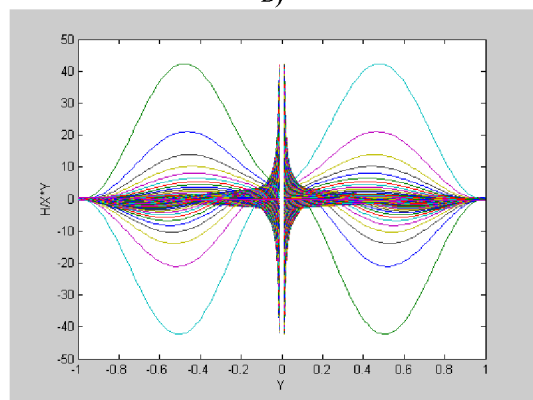
а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Форма галактики при $N = 1$ и $KG = 2^{0.5}$ (а), при $N = 2$ и $KG = 2^1$ (б), при $N = 3$ и $KG = 2^2$ (в) и ее проекция на вертикальную плоскость с учетом координат (г).

По аналогии для космического реактору энтропия будет представлена соотношением

$$H_N = \frac{k_1}{c\omega_N}, \quad (5)$$

$$\omega_N = k \cdot \frac{c^{N-1}}{\ln(c^N)}, \quad N = \overline{1,7}, \quad (6)$$

где k_1, k – константы, необходимые для согласования размерности в формулах;

N – номер гармоники функции Бесселя и соответственно номер стадии эволюции Вселенной.

В [10, 16] формула (6) для расчета частоты реактивности была уточнена введением поправочных коэффициентов, учитывающих влияние шестой группы запаздывающих нейтронов и внешних электромагнитных излучателей, участвующих в создании пространственно-временного монополя ядерного реактора. При такой модификации тенденция изменения энтропии не меняется. Появление в энерговыделении реактора гармоники более высокого порядка приводит к уменьшению энтропии. В соответствии со статистической формулировкой второго начала термодинамики система устойчива, если процессы, протекающие в системе, приводят к уменьшению энтропии [19].

Ядерный реактор является управляемым, а его монополь устойчивым, если его энтропия не превышает значение [14]

$$H_{\max} \approx \frac{\alpha^3}{2\pi}, \quad (7)$$

где α – постоянная тонкой структуры.

Из (5) следует, что энтропия Вселенной с увеличением номера стадии эволюции уменьшается. Представляется, что уточненный расчет энтропии для Вселенной требует введения в (6) поправочных коэффициентов, но это не может так же, как и для ядерного реактора влиять на тенденцию снижения значения энтропии.

Для космического реактора частота N -й гармоники имеет верхний предел и должна удовлетворять следующему соотношению

$$\omega_N < \frac{1}{H_{\max} T_{PL}}, \quad (8)$$

$$T_{PL} = \frac{\hbar}{M_{PL} c^2}, \quad (9)$$

$$M_{PL} = \sqrt{\frac{\hbar c}{\gamma}},$$

где T_{PL} – планковское время,

γ – гравитационная постоянная,

$\hbar$ – постоянная Планка.

После подстановок выражений для T_{PL} и H_{max} соотношение (8) примет вид

$$\omega_N < \frac{2\pi c^{2.5}}{\alpha^3 \sqrt{\gamma \hbar}}. \quad (10)$$

Исходя из (5), (7) и (8), величина энтропия Вселенной находится в пределах

$$\frac{\alpha^3}{2\pi} \cdot \frac{k_1 \sqrt{\gamma \hbar}}{c^{3.5}} < H < \frac{\alpha^3}{2\pi}.$$

Соотношение (10) не выполняется для частот гармоник с $N > 7$, рассчитанных по формуле (6). Порядок гармоник, удовлетворяющих (10) можно определить из соотношения

$$N < \frac{1}{\alpha \ln c} \approx 7,02.$$

При появлении восьмой гармоники в энерговыделении космического реактора происходит дезинтеграция Вселенной с отдачей вакуума и светящейся материи в космический супермонополь. После этого начинается очередной цикл загрузки в космический реактор темной материи с последующим Большим Взрывом, влекущим за собой возникновение Вселенной и ее эволюцию.

Необходимо отметить, что в предлагаемой космологической модели Большой Взрыв не влечет полное разрушение космического реактора, он определяет выброс вещества при сверхвысоких температурах. Представляется, что перевод реактора из надкритического состояния в подкритическое осуществляется мощным импульсом светящегося вещества.

Заключение

Предложена концепция построения мироздания как порождения функционирования пространственно-временного монополя космического реактора в рамках космического супермонополя. Это позволило разрешить противоречия теории осциллирующей Вселенной и связать квантование эволюции Вселенной с цикличностью процесса сжатия-расширения, порождаемого дискретным во времени появлением гармоник более высокого порядка в энерговыделении космического реактора. Выдвинута гипотеза о бесконечности существования космического супермонополя. В рамках этой гипотезы описан процесс взаимодействия монополя космического реактора и космического супермонополя. Определено назначение космического реактора как системы обеспечивающей существование космического супермонополя посредством преобразования энергии и материи.

Определены стадии эволюции Вселенной в одном цикле преобразования энергии. Разработаны модели структуры Вселенной на стадиях эволюции, каждая из которых характеризуется наибольшим порядком гармоник в энергораспределения космического реактора в соответствии с функцией Бесселя. Получены зависимости состава Вселенной от стадии ее эволюции, а именно: доли темной энергии, доли темной материи, доли светящейся материи, доли звездного вещества. Определена зависимость трехмерной топологии Вселенной от состояния космического реактора.

Получена форма Вселенной для настоящего времени и определены формы и структуры галактик на разных стадиях эволюции Вселенной. Введено понятие коэффициента деформации формы монополя, как для галактик, так и для Вселенной, который определяет во сколько раз гравитационная постоянная уменьшается в области сжатия монополя или увеличивается в области задержки относительно значения гравитационной постоянной в области расширения. Показана тенденция уменьшения энтропии Вселенной в процессе эволюции. Определены границы изменения энтропии эволюционирующей Вселенной.

Представляется, что проведенные исследования открывают новые возможности для развития теории квантовой гравитации, определяют новый подход к использованию энергии пространственно-временных монополей галактик при полетах космических аппаратов.

Список литературы

1. Зельдович Я.Б. Новиков И.Д. Строение и эволюция Вселенной. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1975. – 736 с.
2. Рис М., Руффини Р., Уилер Дж. Черные дыры, гравитационные волны и космология. – М.: Мир, 1977. – 376 с.
3. Пенроуз Р. Циклы времени. Новый взгляд на эволюцию Вселенной – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 333 с.
4. Зельдович Я.Б., Блинников С.И., Шакура Н.И. Физические основы строения и эволюции звезд. – М.: МГУ, 1981. – 150 с.
5. Зельдович Я.Б. Новиков И.Д. Теория тяготения и эволюция звезд. – М.: Наука, 1971. – 484 с.
6. Черепашук А.М., Чернин А.Д. Вселенная, жизнь, черные дыры. – Фрязино: «Век 2», 2007. – 320 с.
7. Шкловский И.С. Вселенная, жизнь, разум /Под ред. Н.С. Кардашева и В.И. Мороза – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 320 с.
8. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – М.: Наука, 1984. – 384с.

9. Качур С.А. Модель движения космического аппарата при межгалактических полетах и теория космического реактора // Радиоэлектроника и информатика, 2012. – Вып. 2. – С.43-49.
10. Качур С.А. Энергетическая система Вселенной – Севастополь: «РИБЭСТ», 2012. – 76с.
11. Качур С.А. Управление ядерными реакторами на основе кривизны пространства. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2016. – 220с.
12. Качур С.А. Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №1. – С. 12-19.
13. Качур С.А. Модуляция сингулярности ядерного реактора вблизи мгновенной критичности.// Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2015. – Т.1. – №1. – С. 18-26.
14. Качур С.А. Энтропийный анализ безопасности управления ядерным реактором посредством электромагнитного излучения// Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 4. – С.18-22.
15. Качур С.А. Частотный метод построения систем электромагнитного управления ядерным реактором вблизи мгновенной критичности // Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 5. – С.27-32.
16. Качур С.А. Движение космического аппарата на основе модуляции кривизны пространства // Радиоэлектроника и информатика, 2013. – Вып. 2(21). – С.22-26.
17. Качур С.А. Модуляция кривизны пространства на основе системы ядерных реакторов// Сб.науч.тр.СНУЯЭиП – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014. – Вып. 2(50). – С.13-26.
18. Качур С.А. Движение нерелятивистского объекта в искривленном пространстве ядерного реактора // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №2. – С. 5-10.
19. Новиков И.И., Воскресенский К.Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. – М.: Атомиздат, 1977. – 352 с.
- [Theory of gravitation and evolution of stars]. Moscow, MGU, 1981. 150p.
5. Zel'derovich Ya.B., Novikov I.D. Teoriya tyagoteniya i evolyuciya zvyozd [Theory of gravitation and evolution of stars]. Moscow, Nauka, 1971. 484p.
6. Cherepashuk A.M., Chernin A.D. Universe, life, black holes. [Universe, life, black holes]. Fryazsvo, «Vek 2», 2007. 320 p.
7. Shklovskij I.S. Vseennaya, zhizn', razum [Universe, life, reason]. Moscow, Nauka, 1987. 320p.
8. Shklovskij I.S. Zvyozdy: ih rozhdenie, zhizn' i smert' [Stars: their birth, life and death]. Moscow, Nauka, 1984. 384p.
9. Kachur S.A. Movement model of space vehicle at intergalactic flights and space theory reactor. Radioelectronika i informatika, 2012, No. 2, pp. 43-49.
10. Kachur S.A. Energeticheskaya sistema Vseennoy [Power system of Universe]. Sebastopol: «RIBEST». 2012. 76p.
11. Kachur S.A. Upravlenie yadernymi reaktorami na osnove krivizny prostranstva [Control by nuclear reactors on the basis of space curvature]. Sebastopol: «RIBEST». 2016. 220p.
12. Kachur S.A. Space curvature of nuclear reactor near-by prompt criticality by means of natural spatio-temporal monopole. Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2016, Vol. 2, No 1, pp. 12-19.
13. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2015, Vol. 1, No 1, pp. 18-26.
14. Kachur S.A. Entropic analysis of safety of management by a nuclear reactor by means of electromagnetic radiation. Promyshlennaya teplotekhnika, 2013, Vol. 35, No. 4, pp. 18-22.
15. Kachur S.A. Frequency method of construction of the electromagnetic control systems by a nuclear reactor near-by instantaneous criticism. Promyshlennaya teplotekhnika, 2013, Vol. 35, No. 5, pp. 27-32.
16. Kachur S.A. Movement of space vehicle on the basis of modulation of space curvature. Radioelectronika i informatika, 2013, No. 2(21), pp. 22-26.
17. Kachur S.A. Modulation of space curvature on the basis of the nuclear reactors system. Sb. nauch. tr. SNUYaE i P, Sebastopol, SNUYaE i P, 2014, No. 2(50), pp. 13-26.
18. Kachur S.A. Movement of nonrelativistic object in the distorted space of nuclear reactor. Energeticheskie ustanovki i tekhnologii. 2016, Vol. 2, No 2, pp. 5-10.
19. Novikov I.I., Voskresenskij K.D. Prikladnaya termodinamika i teploperedacha [Applied thermodynamics and heat transfer]. Moscow, Atomizdat, 1977. 352p.

References

1. Zel'derovich Ya.B., Novikov I.D. Stroenie i evolyuciya Vseennoy [Structure and evolution of Universe]. Moscow, Nauka, 1975. 736p.
2. Rees M., Ruffini R., Wheeler J. Chyornnye dyry, gravitacionnye volny i kosmologiya [Black holes, gravitational waves and cosmology]. Moscow, Mir, 1977. 376p.
3. Penrouse R. Cikly vremeni. Novyj vzglyad na evolyuciyu Vseennoy [Cycles of time. New look on evolution of Universe]. Moscow, BINOM, 2014. 333p.
4. Zel'derovich Ya.B., Blinnikov S.I., Shakura N.I. Fizicheskie osnovy stroeniya i evolyuciya zvyozd

УДК 539.3:536.46

Расчет НДС лопаток осевых компрессоров воздушных турбохолодильных машин

В.А. Пухлий¹, С.Т. Мирошниченко², И.Ю. Софийский³, К.В. Пухлий⁴
^{1,2,3}ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹pu1611@rambler.ru, ²miroshnichenkost@gmail.com,
³ttdev@yandex.ru, ⁴АО «Аэротекс», 127349, Москва, ул. Мурановская, 17-147

Статья поступила 10.05.2017 г.; после доработки 11.05.2017 г.

Аннотация

Излагается метод расчета НДС лопаток осевых компрессоров воздушных турбохолодильных машин. Из вариационного принципа Лагранжа получена система обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, аналитическое решение которой затем осуществляется модифицированным методом последовательных приближений, разработанным проф. В.А. Пухлием. Приводится пример расчета.

Ключевые слова: воздушные турбохолодильные машины, лопатки осевых компрессоров, принцип Лагранжа, модифицированный метод последовательных приближений.

Calculation stress-strain state of blades axial compressors of air turborefrigerators machines

V.A. Pukhliy¹, S.T. Miroshnichenko², I.J. Sofijskiy³, K.V. Pukhliy⁴
^{1,2,3}Sevastopol state University, 33 Universitetskaya, 299053, Russia
⁴Aeroteks Enterprase, Moscow, 17-147 Muranovskayast., Russia
¹pu1611@rambler.ru, ²miroshnichenkost@gmail.com, ³ttdev@yandex.ru

Received 10.05.2017 y.; received in final form 11.05.2017 y.

Abstract

The method of calculation of stress-strain state of blades axial compressors of air turborefrigerators machines is stated. From variation principle Lagranges the system of the ordinary differential equations with the variable factors which analytical decision then is carried out by the modified method consecutive approaches, the developed prof. V.A. Pukhliy is received. Example of calculation are resulted.

Keywords: Air turburefrigerators machines, blades axial expansion turbines, principle Lagranges, the modified method consecutive approaches.

Введение

Отечественной промышленностью выпускаются воздушные турбохолодильные машины, разработанные СКБ «Турбохолод» [1].

На рис. 1,а приведена конструктивная схема воздушной турбохолодильной машины типа МТХМ1-25Р, а на рис. 1,б представлен термодинамический цикл работы воздушной турбохолодильной машины.

Воздушная турбохолодильная машина МТХМ1-25Р может эксплуатироваться в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства, в особенности эффективно ее применение в процессах охлаждения и замораживания. Воздушная турбохолодильная машина МТХМ1-25Р предназначена для охлаждения атмосферного воздуха, поступающего к потребителю холода в интервале температур от $T = -50$ °С до $T = -130$ °С. Одновременно можно использовать выходящий из машины горячий воздух температурой $T = +100 \div 120$ °С,

например, при пастеризации молока на молочных заводах.

Воздушная турбохолодильная машина МТХМ1-25Р состоит из:

- осевого 7-ми ступенчатого компрессора,
- осевого турбодетандера,
- двух регенераторов,
- трех клапанных коробок с гидроприводом,
- мультипликатора с электродвигателем.

Все агрегаты машины смонтированы на общей раме.

Основные достоинства турбохолодильной машины следующие:

- использует в качестве хладагента и хладоносителя атмосферный воздух, благодаря чему эксплуатация машины проста и безопасна;
- не требует воды для охлаждения хладагента;
- осуществляет процесс охлаждения объектов непосредственным контактом с хладагентом;
- быстро выходит на расчетный режим;
- не требует предварительной осушки воздуха;
- имеет небольшие удельную металлоемкость и габаритные размеры.

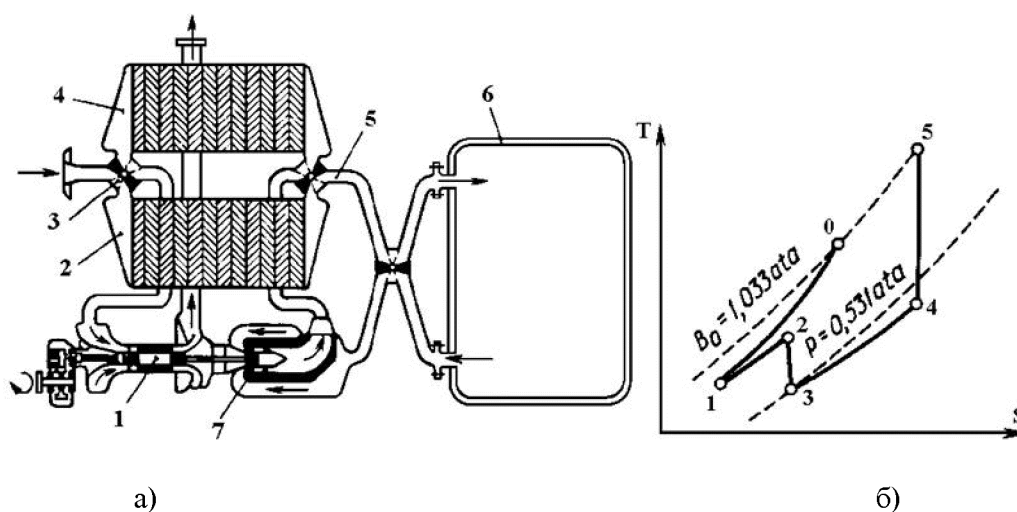


Рис. 1. Воздушная турбохолодильная машина типа МТХМ1-25Р:
а) конструктивная схема; б) термодинамический цикл работы.

Отличительной особенностью воздушной турбохолодильной машины МТХМ1-25Р является тот факт, что атмосферный воздух в конце цикла выбрасывается вновь в атмосферу в горячем состоянии, не требуя охлаждения.

Принцип работы машины следующий. Атмосферный воздух подается вентилятором во входной патрубок машины и через клапанную коробку 3 поступает в предварительно охлажденный регенератор 2 (процесс 0 - 1, рис. 1,б). Затем охлажденный и осушенный воздух температурой $T = -80^\circ\text{C}$ через вторую клапанную коробку 5 подается в потребитель холода 6, где нагревается до температуры $T = -50^\circ\text{C}$, отбирая тепло от охлаждаемых объектов (процесс 1 - 2, рис. 1,б).

В турбодетандере 7 воздух расширяется до давления $P = 0,5 \text{ кгс/см}^2$ (процесс 2 - 3, рис. 1,б), производя механическую работу, при этом температура его понижается до $T = -84^\circ\text{C}$. Через клапанную коробку 5 воздух направляется во второй регенератор 4, охлаждает его насадку

(процесс 3 - 4, рис. 1, б) и через клапанную коробку 3 поступает в компрессор 1, где сжимается до атмосферного давления (процесс 4 - 5, рис. 1,б), нагреваясь до температуры $T = 100 - 120^\circ\text{C}$ и выбрасывается в атмосферу.

При переключении регенераторов 2 и 4 атмосферный воздух охлаждается в одном из них, в то время как насадка другого регенератора «заряжается» охлажденным в турбодетандере воздухом.

Технические характеристики машины МТХМ1-25Р следующие:

- холодопроизводительность, ккал/ч 26000
- температура воздуха на входе в потребитель холода, $^\circ\text{C}$ -80
- разность температур на входе и выходе из потребителя холода, $^\circ\text{C}$ 30
- расход холодного воздуха, кг/ч 3400
- напряжение электропитания двигателя переменного тока, В 380/220

- частота тока, Гц	50
- частота вращения вала электродвигателя, об/мин	3000
- габаритные размеры, мм	4955×2580×2445
- масса, кг	4800

Постановка цели научной работы

Целью научной работы является разработка метода расчета на прочность рабочих лопаток осевых компрессоров воздушных турбохолодильных машин.

Построена математическая модель, при которой напряженно-деформированное состояние (НДС) лопатки описывается системой дифференциальных уравнений теории оболочек в частных производных. В дальнейшем решение задачи основано на использовании метода интегральных соотношений Дородницына и модифицированного метода последовательных приближений, разработанного проф. В.А. Пухлий и изложенном им в академической печати [7-10].

Формулировка задачи по расчету НДС лопаток осевых компрессоров

Рабочие лопатки турбомашин, в частности, компрессоров относятся к самым напряженным и ответственным деталям осевых агрегатов, поломка которых может вывести из строя весь агрегат.

Рабочие лопатки осевых турбомашин представляют собой, как правило, тонкостенные естественно закрученные стержни, консольно закрепленные. 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. Дальнейшее совершенствование методов расчета рабочих лопаток осевых турбомашин выявило недостаточность некоторых представлений классической теории стержней.

Второй подход к решению задач расчета рабочих лопаток, при котором используется теория оболочек для анализа поведения рабочих лопаток осевых турбомашин, начал применяться сравнительно недавно, причем рассматривались в основном задачи о колебаниях лопаток [2 - 4]. При использовании теории оболочек лопатки рассматриваются жестко защемленные по одному из краев и имеющие условия свободного края по остальным сторонам лопатки в поле действия центробежных сил инерции собственных масс лопаток, а также в условиях высокотемпературного нагрева и аэродинамического воздействия потока.

В работе [5] рассматривался расчет на прочность трехслойных лопаток осевых турбомашин и напряженно-деформированное состояние (НДС) рабочих лопаток осевых компрессоров применительно к воздушным турбохолодильным машинам.

На рис.2 приведен продольный разрез осевого компрессора [6].

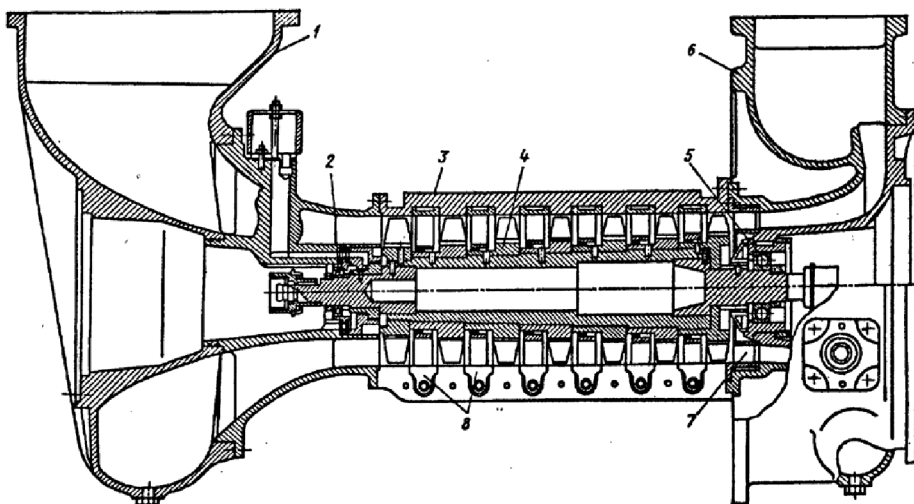


Рис. 2. Продольный разрез осевого компрессора воздушной холодильной машины типа МТХМ1-25Р.

Осевой компрессор воздушной холодильной машины типа МТХМ1-25Р (рис.2) состоит из входного патрубка 1, корпуса 3 и выходного патрубка 6. Компрессор – 7-ми ступенчатый. Ротор

4 представляет собой ступенчатый барабан, на котором смонтированы 7 дисков с лопатками, которые образуют рабочие решетки ступеней. Лопатки изготавливаются с хвостовиками типа

«Ласточкин хвост», при помощи которых монтируются в дисках. Ротор вращается в подшипниках качения: опорном 2 и опорно-упорном 5. В корпусе компрессора смонтированы направляющие аппараты 8 и спрямляющий аппарат 7, при этом сам корпус имеет горизонтальный разъем. Лопатки направляющих и спрямляющего аппаратов монтируются в прорези наружного и внутреннего бандажей, изготовленных по форме лопаток.

Технические характеристики 7-ми ступенчатого осевого компрессора следующие:

- частота вращения $n = 342 \text{ с}^{-1}$;
- отношение давления $\pi_k^* = 2,17$;
- массовая производительность $G = 1 \text{ кг/с}$;
- изоэнтальпийный КПД $\eta_s^* = 0,85$;
- число $M_n' = 0,6$;
- давление торможения при входе в компрессор $p_H^* = 0,048 \text{ МПа}$.

Решение задачи, описываемое системой дифференциальных уравнений в частных производных основано на применении метода интегральных соотношений Дородницына. В дальнейшем аналитическое решение полученной краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами основано на использовании модифицированного метода последовательных приближений, разработанного профессором В.А. Пухлий и изложенным им в академической печати [7 - 10].

Подчеркнем, что изложенный в дальнейшем алгоритм решения использовался в работах [11 - 13] применительно к рабочим лопаткам радиальных турбодетандеров.

Проведем вывод уравнений равновесия и естественных граничных условий рабочих лопаток осевых турбомашин.

На рис. 3 приведена геометрия закрученной лопатки. Предполагается, что лопатка образована винтовым движением слабоизогнутого профиля, скользящего относительно неподвижной оси и поворачивающегося относительно этой оси на угол φ_0 с постоянной угловой скоростью.

Геометрия лопатки задается следующим образом. Функция изменения толщины лопатки записывается в виде:

$$h(\xi, \eta) = h_0 t_1(\xi) t_2(\eta), \quad (1)$$

здесь h_0 – максимальная толщина лопатки, заданная в корневом сечении.

Безразмерные функции $t_1(\xi)$ и $t_2(\eta)$, характеризуют относительное изменение толщины лопатки по ее длине и по ширине.

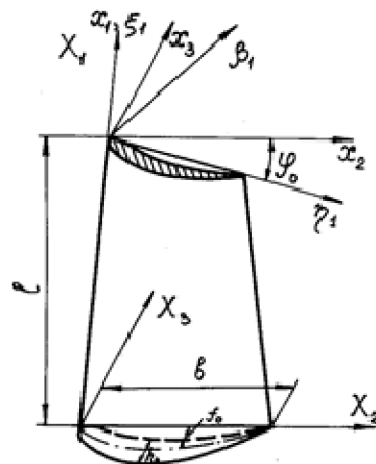


Рис. 3. Геометрия и система координат естественно закрученной консольной лопатки.

Остановимся более подробно на способах задания профиля лопатки, в особенности, профиля по ее хорде.

Изменение толщины лопатки по хорде, как правило, задается таблично (рис. 4).

Однако, при расчетах необходимо иметь закон изменения толщины профиля в аналитическом виде.

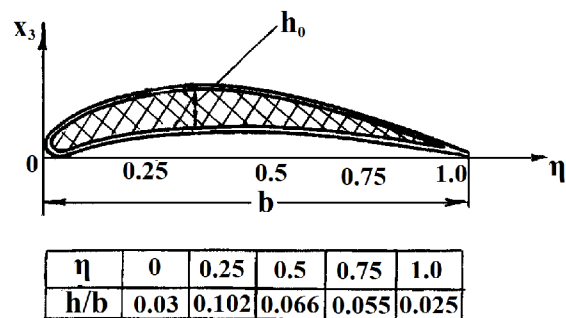


Рис. 4. Табличный способ задания профиля лопатки по хорде.

Следует отметить, что выбор удачного вида функциональной зависимости по данным таблицы зависит от многих факторов, и каждый раз требует от исследователя тщательного анализа. Обычно функция изменения толщины профиля лопатки задается с помощью интерполяционных полиномов либо рациональных дробей. Заметим, что рациональные дроби имеют существенные недостатки как аппарат приближения для функций с не слишком большой гладкостью. Основной недостаток применения рациональных дробей заключается в том, что их поведением в

окрестности какой-либо точки определяется поведение в целом.

Здесь для задания толщины профиля лопатки в аналитическом виде используются сплайновые интерполяции [14], которые особенно эффективны при решении краевых задач для эллиптических уравнений в частных производных с гладкими коэффициентами. При этом для интерполяции функции изменения толщины профиля используется интерполяция сплайном – многочленом n -й степени:

$$s(\eta) = \sum_{k=0}^n a_{ik} \eta^k \quad \eta_{i-1} \leq \eta \leq \eta_i,$$

коэффициенты которого кусочно постоянны и который в узлах интерполяции принимает заданные значения и непрерывен вместе со своими $n - 1$ производными.

Подчеркнем, что при нечетной степени многочлена $n = 2r - 1$ сплайновая интерполяция эквивалентна лагранжевой интерполяции при дополнительном условии:

$$\int_0^1 [s^r(\eta)]^2 d\eta = \min.$$

В дальнейшем принимая $n = 3$, функцию изменения толщины профиля лопатки по хорде будем представлять в виде кубических сплайнов.

В результате выражения для $t_1(\xi)$ и $t_2(\eta)$ представляем в следующем виде:

$$\begin{aligned} t_1 &= \lambda_1 [1 + (\psi_1 - 1)\xi]; \\ t_2 &= [b_{1i} + b_{2i}(\eta - \eta_{i-1}) + b_{3i}(\eta - \eta_{i-1})^2 + \\ &+ b_{4i}(\eta - \eta_{i-1})^3], \end{aligned} \quad (2)$$

здесь $\xi = \xi_1/l$ и $\eta = \eta_1/b$ – безразмерные координаты лопатки ($0 \leq \xi \leq 1$; $0 \leq \eta \leq 1$); $\lambda_1 = l/h_0$; $\psi_1 = h_k/h_0$ – отношение толщины лопатки в периферийном сечении к толщине лопатки в корневом сечении. В выражении для t_2 величины b_{ki} ($i = 1, 2, 3, 4$) являются коэффициентами кубических сплайнов и определяются на каждом интервале из условий в узлах [14].

Уравнение срединной поверхности лопатки записывается в виде:

$$f(\xi, \eta) = f_0 f_1(\xi) f_2(\eta), \quad (3)$$

здесь f_0 – максимальная стрела изогнутости лопатки в корневом сечении. Безразмерные функции f_1 и f_2 , характеризующие относительное изменение стрелы изогнутости лопатки

по ее длине и по ширине соответственно, задаются в виде:

$$\begin{aligned} f_1 &= [1 + (k - 1)\xi]; \\ f_2 &= [a_{1i} + a_{2i}(\eta - \eta_{i-1}) + a_{3i}(\eta - \eta_{i-1})^2 + \\ &+ a_{4i}(\eta - \eta_{i-1})^3], \end{aligned} \quad (4)$$

где $k = f_1/f_0$ – отношение стрелы изогнутости в периферийном сечении к стреле изогнутости в корневом сечении. Величины a_{ki} ($i = 1, 2, 3, 4$) являются коэффициентами кубических сплайнов [14].

Закон закрутки лопатки принимается в виде:

$$\varphi = \lambda^{-1} x_1, \quad (5)$$

где λ^{-1} – параметр закрутки равный φ_0/l (закрутка на единицу длины).

Переходим к рассмотрению геометрических параметров лопатки. Примем неподвижную систему координат $X_1 X_2 X_3$ с началом O , причем ось X_2 направим по хорде лопатки (рис.3). Кроме того, рассмотрим подвижную систему координат $x_1 x_2 x_3$ параллельную системе $X_1 X_2 X_3$, но с началом O_1 , а также подвижную систему координат $\xi_1 \eta_1 \beta_1$, у которой ось ξ_1 совпадает с осью x_1 , ось η_1 – с направлением подвижной хорды, а ось β_1 – перпендикулярна оси η_1 . Вполне очевидно, что система координат $\eta_1 O_1 \beta_1$ в каждом сечении лопатки повернута относительно системы $X_2 O X_3$ на угол $\varphi(x_1) = x_1 \lambda^{-1}$. Принимая это во внимание, запишем в векторной форме уравнение срединной поверхности лопатки. Запишем компоненты радиуса – вектора:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \lambda \varphi = \xi_1; \\ x_2 &= \eta_1 \cos \varphi - \beta_1 \sin \varphi; \\ x_3 &= \eta_1 \sin \varphi + \beta_1 \cos \varphi. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Выражение для радиус-вектора получим в виде:

$$\begin{aligned} \vec{R} = \vec{R}(\eta_1, \beta_1) &= \lambda \vec{\varphi} + (\eta_1 \cos \varphi - \beta_1 \sin \varphi) \vec{j} + \\ &+ (\eta_1 \sin \varphi + \beta_1 \cos \varphi) \vec{k}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $\vec{i}$, $\vec{j}$, $\vec{k}$ – единичные векторы, а β_1 совпадает с f – формула (3).

Дифференцируя радиус-вектор $\vec{R}(\eta_1, \beta_1)$ по β_1 и η_1 с учетом предположения о пологости ло-

патки, получим выражения для параметров Ляме и выражения для кривизны:

$$\begin{aligned} A_1 &= 1; \quad A_2 = 1; \quad A_{12} = 0; \\ k_{11} &= 0; \quad k_{22} = f_{,22}; \quad k_{12} = f_{,12} + \lambda^{-1}, \end{aligned} \quad (8)$$

здесь нижний индекс i , следующий после запятой, означает частное дифференцирование по координате x_i , при этом $i = 1$ соответствует дифференцированию по ξ_1 , а $i = 2$ по η_1 .

Запишем выражения для параметров срединной поверхности лопатки:

$$\begin{aligned} e_{11} &= u_{,11}; \quad \chi_{11} = w_{,11}; \\ e_{22} &= u_{,2,2} - k_{22}w; \quad \chi_{22} = w_{,22}; \\ e_{12} &= u_{,1,2} + u_{,2,1} - 2k_{12}w; \quad \chi_{12} = w_{,12}, \end{aligned} \quad (9)$$

а также выражения для тангенциальных усилий и моментов:

$$\left. \begin{aligned} N_{11} &= \frac{Eh}{1-\nu^2} [u_{,11} + \nu u_{,2,2} - \nu k_{22}w]; \\ N_{22} &= \frac{Eh}{1-\nu^2} [u_{,2,2} + \nu u_{,1,1} - k_{22}w]; \\ N_{12} &= \frac{Eh}{1+\nu} [u_{,2,1} + u_{,1,2} - 2k_{12}w]; \\ M_{11} &= D(w_{,11} + \nu w_{,22}); \\ M_{22} &= D(w_{,22} + \nu w_{,11}); \\ M_{12} &= D(1-\nu)w_{,12}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \text{Определим деформации слоев:} \\ \varepsilon_{ij} &= e_{ij} + z\chi_{ij}. \end{aligned} \quad (12)$$

На основе закона Гука запишем выражения для напряжений:

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1-\nu^2} [(1-\nu)\varepsilon_{ij} + \nu\delta_{ij}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})], \quad (13)$$

где δ_{ij} – символ Кронеккера: $\delta_{ii} = 1$, $\delta_{ij} = 0$ при $i \neq j$.

Вывод исходных уравнений проведем на основе вариационного принципа Лагранжа, согласно которому:

$$-\delta\Pi + \delta A_1 + \delta A_2 = 0, \quad (14)$$

где $\delta\Pi$ – вариация работы внутренних сил;

δA_1 – вариация работы внешней нагрузки, приложенной к поверхности лопатки;

δA_2 – вариация работы внешних контурных усилий.

Вычислим вариацию работы внутренних сил упругости лопатки, равную вариации потен-

циальной энергии деформации лопатки с обратным знаком:

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= \iint_{\Omega} \left[\int_{-h/2}^{h/2} \sum_{i,j} \sigma_{ij} \delta\varepsilon_{ij} dz d\xi_1 d\eta_1 = \right. \\ &= \iint_{\Omega} \left(\sum_{i,j} N_{ij} \delta\varepsilon_{ij} + \sum_{i,j} M_{ij} \delta\chi_{ij} \right) d\xi_1 d\eta_1, \end{aligned} \quad (15)$$

здесь:

$$N_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} dz; \quad M_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{ij} z dz,$$

где Ω – площадь исходной поверхности лопатки.

Произведя в (15) интегрирование по частям, получим:

$$\begin{aligned} \delta\Pi &= \int_0^l \int_0^b [-L_1 \delta u_1 - L_2 \delta u_2 - L_3 \delta w] d\xi_1 d\eta_1 + \\ &+ \int_0^l J_1 d\xi_1 \Big|_0^b + \int_0^b J_2 d\eta_1 \Big|_0^l - 2M_{12} \delta w \Big|_0^l \Big|_0^b, \end{aligned} \quad (16)$$

где операторы L_m и J_n ($m = 1, 2, 3$; $n = 1, 2$) следующие:

$$\begin{aligned} L_1 &= N_{11,1} + N_{12,2}; \\ L_2 &= N_{22,2} + N_{12,1}; \\ L_3 &= M_{11,11} + 2M_{12,12} + M_{22,22} - k_{22}N_{22} - \\ &- 2k_{12}N_{12} - p_1 w_{,1}. \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} J_1 &= N_{12} \delta u_1 + N_{22} \delta u_2 - M_{22} \delta w_{,2} + \\ &+ (M_{22,2} + 2M_{12,1}) \delta w; \\ J_2 &= N_{11} \delta u_1 + N_{12} \delta u_2 - M_{11} \delta w_{,1} + \\ &+ (M_{11,1} + 2M_{12,2}) \delta w. \end{aligned} \quad (18)$$

В выражениях (18) содержатся члены вида $M_{11} \delta w_{,1}$ и $M_{22} \delta w_{,2}$. При их преобразовании будем пользоваться формулой дифференцирования произведения. В результате получим:

$$\begin{aligned} J_1^* &= N_{12} \delta u_1 + N_{22} \delta u_2 + \\ &+ 2(M_{22,2} + M_{12,1}) \delta w - M_{22} \delta w \Big|_0^b; \\ J_2^* &= N_{11} \delta u_1 + N_{12} \delta u_2 + \\ &+ 2(M_{11,1} + M_{12,2}) \delta w - M_{11} \delta w \Big|_0^l. \end{aligned} \quad (19)$$

Вариация работы внешней поверхностной нагрузки, приведенной к срединной поверхности лопатки, запишется следующим образом:

$$\delta A_1 = \int_0^l \int_0^b (p_1 \delta u_1 + p_2 \delta u_2 + q \delta w) d\xi_1 d\eta_1. \quad (20)$$

С учетом выражений (16), (19) и (20) при отсутствии внешних контурных усилий на основе вариационного принципа Лагранжа получим:

$$\int_0^l \int_0^b \{ (L_1 + p_1) \delta u_1 + (L_2 + p_2) \delta u_2 + (L_3 - q) \delta w \} d\xi_1 d\eta_1 - \int_0^l J_1^* d\xi_1 \Big|_0^b - \int_0^b J_2^* d\eta_1 \Big|_0^l - (M_{11} + M_{22} - 2M_{12}) \delta w \Big|_0^l \Big|_0^b = 0. \quad (21)$$

Первый интеграл в выражении (21) доставляет дифференциальные уравнения задачи, второй и третий – граничные условия.

Введем безразмерные координаты по формулам:

$$\xi = \frac{\xi_1}{l}; \quad \eta = \frac{\eta_1}{b}; \quad m = \frac{l}{b}$$

и безразмерные функции перемещений:

$$\bar{u}_1 = \frac{u_1}{h_0}; \quad \bar{u}_2 = \frac{u_2}{h_0}; \quad \bar{w} = \frac{w}{h_0}.$$

Подставляя в вариационное уравнение Лагранжа выражения (10) и (11), запишем уравнение (21) в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \int_0^1 \left\{ \frac{d_1}{1-\nu^2} [\bar{u}_{1,11} + m\bar{u}_{2,12} + (1-\nu)m^2\bar{u}_{1,22} - \nu k_{22}l\bar{w}_{,1} - 2(1-\nu)mk_{12}l\bar{w}_{,2}] + \right. \\ & + \frac{d_9}{1-\nu^2} (\bar{u}_{1,1} + \nu m\bar{u}_{2,2} - \nu k_{22}l\bar{w}) + \frac{md_{10}}{1-\nu^2} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2} - 2k_{12}l\bar{w}) + \frac{p_1 l^2}{Eh_0^2} \Big\} \delta \bar{u}_1 + \\ & + \left\{ \frac{d_1}{1-\nu^2} [m^2\bar{u}_{2,22} + m\bar{u}_{1,12} + (1-\nu)\bar{u}_{2,11} - mk_{22}l\bar{w}_{,2} - 2(1-\nu)k_{12}l\bar{w}_{,1}] + \right. \\ & + \frac{d_9}{1+\nu} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2} - 2k_{12}l\bar{w}) + \frac{md_{10}}{1-\nu^2} (m\bar{u}_{2,2} + \nu u_{1,1} - k_{22}l\bar{w}) + \frac{p_2 l^2}{Eh_0^2} \Big\} \delta \bar{u}_2 + \\ & + \left\{ \frac{h_0 d_5}{l^2} \nabla_m^4 \bar{w} + 2 \frac{h_0^2 d_3}{l^2} (\nabla_m^2 \bar{w})_{,1} + 2 \frac{m^2 h_0^2 d_4}{l^2} (\nabla_m^2 \bar{w})_{,2} + \frac{h_0^2}{l^2} [(d_6 + \nu m^2 d_8) \bar{w}_{,11} + \right. \\ & + m^2 (\nu d_8 + d_8) \bar{w}_{,22} + 2(1-\nu)m^2 d^7 \bar{w}_{,12} - \frac{p_1 l^2}{Eh_0} \bar{w}_{,1} + \frac{k_{22} l^2 d_1}{(1-\nu^2)} \bar{w} + \\ & + 4 \frac{k_{12}^2 d_1 l^2}{1+\nu} \bar{w} - \frac{ld_1 k_{22}}{1-\nu^2} (m\bar{u}_{2,2} + \nu u_{1,1}) - 2 \frac{k_{12} l d_1}{1+\nu} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2}) - \frac{q l^2}{Eh_0^2} \Big\} \delta \bar{w} \Big\} d\xi d\eta - \\ & - \int_0^1 \left\{ \left[\frac{md_1}{1+\nu} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2} - 2k_{12}l\bar{w}) \delta \bar{u}_1 + \frac{md_1}{1-\nu^2} (m\bar{u}_{2,2} + \nu \bar{u}_{1,1} - k_{22}l\bar{w}) \delta \bar{u}_2 + \right. \right. \\ & + 2 \frac{m^2 h_0 d_4}{l^2} (m^2 \bar{w}_{,22} + \nu \bar{w}_{,11}) + 2 \frac{m^2 h_0^2 d_5}{l^2} (m^2 \bar{w}_{,22} + \nu \bar{w}_{,11}) + \\ & + 2 \frac{(1-\nu)m^2 h_0^2 d_3}{l^2} \bar{w}_{,12} + 2 \frac{(1-\nu)m^2 h_0^2 d_5}{l^2} \bar{w}_{,112} \Big] \delta \bar{w} \Big\} d\xi \Big|_0^1 - \int_0^1 \left[\frac{d_1}{1-\nu^2} (\bar{u}_{1,1} + \nu m\bar{u}_{2,2} - \right. \\ & - \nu k_{22}l\bar{w}) \delta \bar{u}_1 + \frac{d_1}{1+\nu} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2} - 2k_{12}l\bar{w}) \delta \bar{u}_2 + 2 \frac{d_3 h_0^2}{l^2} (\bar{w}_{,11} + \nu m^2 \bar{w}_{,22}) + \\ & + 2 \frac{d_5 h_0^2}{l^2} (\bar{w}_{,111} + \nu m^2 \bar{w}_{,122}) + 2 \frac{(1-\nu)m^2 h_0^2 d_4}{l^2} \bar{w}_{,12} + \\ & + 2 \frac{(1-\nu)m^2 h_0^2 d_5}{l^2} \bar{w}_{,122} \Big] \delta \bar{w} \Big\} d\eta \Big|_0^1 - \frac{mh_0^2 d_5}{l^2} [(1+\nu) \nabla_m^2 \bar{w} + 2(1-\nu)m\bar{w}_{,12}] \delta \bar{w} \Big|_0^1 \Big|_0^1 = 0. \end{aligned} \quad (22)$$

Безразмерные параметры лопатки d_i определяются выражениями:

$$\begin{aligned} d_1 &= t_1 t_2; & d_3 &= \frac{t_1^2 t_{1,1} t_2^3}{4(1-\nu^2)}; & d_7 &= \frac{3}{4(1-\nu^2)} t_1^2 t_{1,1} t_2^2 t_{2,2}; & d_9 &= t_{1,1} t_2; \\ d_4 &= \frac{t_1^3 t_2^2 t_{2,2}}{4(1-\nu^2)}; & d_5 &= \frac{t_1^3 t_2^3}{12(1-\nu^2)}; & d_8 &= \frac{t_1^3}{4(1-\nu^2)} (2t_2 t_{2,2}^2 + t_2^2 t_{2,22}); \\ d_6 &= \frac{t_2^3}{4(1-\nu^2)} (2t_1 t_{1,1}^2 + t_1^2 t_{1,11}); & d_{10} &= t_1 t_{2,2}. \end{aligned} \quad (23)$$

Приравняв нулю выражения, стоящие перед вариациями независимых переменных, получим уравнения равновесия лопатки в перемещениях:

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \int_0^1 \left\{ \frac{d_1}{1-\nu^2} [\bar{u}_{1,11} + m\bar{u}_{2,12} + (1-\nu)m^2\bar{u}_{1,22} - \nu k_{22}l\bar{w}_{,1} - 2(1-\nu)mk_{12}l\bar{w}_{,2}] + \right. \\ & + \frac{d_9}{1-\nu^2} (\bar{u}_{1,1} + \nu m\bar{u}_{2,2} - \nu k_{22}l\bar{w}) + \frac{md_{10}}{1+\nu} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2} - 2k_{12}l\bar{w}) + \frac{p_1 l^2}{Eh_0^2} \Big\} d\xi d\eta - \\ & - \int_0^1 \frac{md_1}{1+\nu} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2} - 2k_{12}l\bar{w}) d\xi \Big|_0^1 - \int_0^1 \frac{d_1}{1-\nu^2} (\bar{u}_{1,1} + \nu m\bar{u}_{2,2} - \nu k_{12}l\bar{w}) d\eta \Big|_0^1 = 0; \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \int_0^1 \left\{ \frac{d_1}{1-\nu^2} [m^2\bar{u}_{2,22} + m\bar{u}_{1,12} + (1-\nu)\bar{u}_{2,11} - mk_{22}l\bar{w}_{,2} - 2(1-\nu)k_{12}l\bar{w}_{,1}] + \frac{d_9}{1+\nu} \times \right. \\ & \times (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2} - 2k_{12}l\bar{w}) + \frac{md_{10}}{1-\nu^2} (m\bar{u}_{2,2} + \nu\bar{u}_{1,1} - k_{22}l\bar{w}) + \frac{p_2 l^2}{Eh_0^2} \Big\} d\xi d\eta - \\ & - \int_0^1 \frac{md_1}{1-\nu^2} (m\bar{u}_{2,2} + \nu\bar{u}_{1,1} - k_{22}l\bar{w}) d\xi \Big|_0^1 - \int_0^1 \frac{d_1}{1+\nu} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2} - 2k_{12}l\bar{w}) d\eta \Big|_0^1 = 0. \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} & \int_0^1 \int_0^1 \left\{ \nabla_m^4 \bar{w} + 2 \frac{d_3}{d_5} (\nabla_m^2 \bar{w})_{,1} + 2 \frac{m^2 d_4}{d_5} (\nabla_m^2 \bar{w})_{,2} + d_5^{-1} [(d_6 + \nu m^2 d_8) \bar{w}_{,11} + \right. \\ & + m^2 (\nu d_6 + d_8) \bar{w}_{,22} + 2(1-\nu)m^2 d_7 \bar{w}_{,12}] - \frac{p_1 l^3 d_5^{-1}}{Eh_0^3} \bar{w}_{,1} + \frac{k_{22} d_1 l^4}{(1-\nu)h_0^2 d_5} \bar{w} + \\ & + 4 \frac{k_{12}^2 d_1 l^3}{(1+\nu)h_0^2 d_5} \bar{w} - \frac{k_{12} d_1 l^3}{(1-\nu^2)h_0 d_5} (m\bar{u}_{2,2} + \nu\bar{u}_{1,1}) - 2 \frac{k_{12} d_1 l^3}{(1+\nu)h_0^2 d_5} (\bar{u}_{2,1} + m\bar{u}_{1,2}) - \\ & - \frac{ql^4}{Eh_0^4} d_5^{-1} \Big\} d\xi d\eta - 2 \frac{m^2 h_0^2}{l^2} \int_0^1 [d_5 (\nabla_m^2 \bar{w})_{,2} + d_4 (\nu \bar{w}_{,11} + m^2 \bar{w}_{,22}) + \\ & + (1-\nu)d_3 \bar{w}_{,12}] d\xi \Big|_0^1 - 2 \frac{h_0^2}{l^2} \int_0^1 [d_5 (\nabla_m^2 \bar{w})_{,1} + d_3 (\bar{w}_{,11} + \nu m^2 \bar{w}_{,22}) + \\ & + (1-\nu)m^2 d_4 \bar{w}_{,12}] d\eta \Big|_0^1 - \frac{mh_0^2 d_5}{l^2} [(1+\nu)\nabla_m^2 \bar{w} + 2(1-\nu)m\bar{w}_{,12}] \Big|_0^1 = 0. \end{aligned} \quad (26)$$

Решение краевой задачи

Поскольку точного решения задачи о расчетах консольной лопатки осевого компрессора

не найдено, весьма актуальными являются аналитические приближенные методы. Одним из наиболее точных и эффективных является ме-

тод интегральных соотношений Дородницына [15], применяемый здесь для сведения уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям. При этом в приводимом решении прогиб задается в виде конечного ряда по образующей лопатки, а не по хорде лопатки. Вследствие этого оказывается возможным получение достаточно точных результатов при решении с двумя членами ряда, тогда как при задании аппроксимирующих функций вдоль хорды лопатки необходимо брать значительно большее число членов ряда. Кроме того, метод интегральных соотношений [15] позволяет получить более точное распределение прогибов по хорде лопатки, поскольку направление по хорде принято дифференциальным. В дальнейшем при решении полученной системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами применяется модифицированный метод последовательных приближений в смещенных полиномах Чебышева [7 - 10]. Указанный аналитический подход разработан применительно к решению двумерных краевых задач математической физики для систем эллиптических дифференциальных уравнений и изложен наиболее полно в работах [7-10].

К решению исходной системы уравнений в частных производных (24)-(26) применим метод интегральных соотношений Дородницына [15].

В соответствии с методом представим исходную систему уравнений (24)-(26) в дивергентной форме:

$$\frac{\partial \bar{X}}{\partial \xi} + \frac{\partial \bar{Y}}{\partial \eta} + \bar{L} = 0, \quad (27)$$

$$\bar{X} = \{X_i\} = \{\bar{u}_1, \bar{u}_1, w, \bar{z}_1, \bar{z}_2, \bar{z}_3, \bar{z}_4, \bar{z}_5\};$$

$$\bar{Y} = B_0 \bar{X} + B_1 \frac{\partial \bar{X}}{\partial \eta} + B_2 \frac{\partial^2 \bar{X}}{\partial \eta^2} + B_3 \frac{\partial^3 \bar{X}}{\partial \eta^3};$$

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

Через функции $z_1, z_2, \dots, z_5$ обозначены:

$$z_1 = \bar{u}_{1,2}; \quad z_2 = \bar{u}_{2,2}; \quad z_3 = \bar{w}_{,2}; \quad z_4 = \bar{w}_{,22};$$

$$z_5 = \bar{w}_{,222}.$$

Здесь нижний индекс i , после запятой, означает частное дифференцирование по соответствующей координате ($i = 1$ по ξ ; $i = 2$ по η).

В уравнениях (27) $B_r = \{b_{mn}^r\}$ и $B = \{b_{mn}\}$ ($r = 0, 1, 2, 3$; $m, n = 1, 2, \dots, 8$) – элементы матриц преобразования.

В соответствии с методом интегральных соотношений представим решение системы уравнений (24)-(26) в виде разложения:

$$Y_i(\xi, \eta) = \begin{cases} \sum_{j=1}^n Y_i(\eta) P_j(\xi) & (i = 3, 6, 7, 8); \\ \sum_{j=1}^n Y_i(\eta) P_{j,1}(\xi) & (i = 1, 2); \\ \sum_{j=1}^n Y_i(\eta) P_{j,11}(\xi) & (i = 4, 5). \end{cases} \quad (28)$$

Здесь $P_j(\xi)$ – система аппроксимирующих функций; $X_{ij}(\eta)$ – неизвестные функции, определяемые в дальнейшем в результате решения системы обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами.

В качестве системы аппроксимирующих функций выбираем ортонормированные на интервале $[0, 1]$ полиномы Якоби [16], подчиненные условиям жесткого заземления края лопатки при $\xi = 0$:

$$\begin{aligned} P_1(\xi) &= \sqrt{9}(28\xi^4 - 42\xi^3 + 15\xi^2); \\ P_2(\xi) &= \sqrt{11}(120\xi^5 - 152\xi^4 + 168\xi^3 - 35\xi^2); \\ P_3(\xi) &= \sqrt{13}(495\xi^6 - 1320\xi^5 + 1260\xi^4 - \\ &\quad - 504\xi^3 + 70\xi^2). \end{aligned} \quad (29)$$

Применяя процедуру метода интегральных соотношений к уравнениям (24)-(26), получим разрешающую систему 16-ти обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами относительно искомым функций X_i в общем случае неэйлеровского типа:

$$\frac{dY_m}{d\eta} = \sum_{v=1}^s B_{v,m} Y_v + f_m \quad m = 1, 2, \dots, s. \quad (30)$$

Здесь m – номер уравнения; v – номер неизвестной функции, при которой стоит коэффициент $B_{v,m}$.

Применение модифицированного метода последовательных приближений к интегрированию систем дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами

В работах профессора В.А. Пухлия [7 - 9] для интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений произвольного порядка с переменными коэффициентами был предложен модифицированный метод последовательных приближений. В работе [10] рас-

смотрены вопросы сходимости предложенного метода.

В настоящей работе модифицированный метод последовательных приближений применяется к интегрированию систем обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами 16-го порядка.

В соответствии с методом переменные коэффициенты $B_{v,m}$ и свободные члены f_m в уравнениях (30) представим через смещенные полиномы Чебышева:

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

$$f_m = \sum_{r=0}^q f_{m,r} (d_r \cdot r!)^{-1} \sum_{k=0}^r a_k T_k^*(\eta), \quad (31)$$

здесь q – степень интерполяционного полинома; a_k – коэффициенты разложения η^r в ряд по многочленам Чебышева $T_k^*(\eta)$. В выражениях (31) $d_r = 1$ для $r = 0$ и $d_r = 2^{2r-1}$ для остальных r .

Общее решение системы уравнений (30) имеет вид [9, 10]:

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

$$+ \sum_{j=0}^q t_{m,j,0} [d_{j+1} (j+1)!]^{-1} \sum_{k=0}^{j+1} a_k T_k^*(\eta) + \sum_{n=2}^{\infty} X_{m,n}, \quad (32)$$

где $t_{m,j,0} = f_{m,r}$ при $j = r$; μ – номер фундаментальной функции; C_{μ} – постоянные интегрирования.

В решении (32) будет $\delta = 1$, если $m = \mu$ и $\delta = 0$ для остальных μ . Первое приближение $X_{m,\mu,1}$ получается из подстановки нулевого приближения:

$$d_0^{-1} a_0 T_0^*(\eta) \delta \quad \text{в правую часть системы}$$

$$\frac{dY_m}{d\xi} = \sum_{v=1}^s B_{v,m} Y_v.$$

Последующие приближения осуществляются по формулам:

$$Y_{m,\mu,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,\mu,n,j} [d_{n+j-1} (n+j-1)!]^{-1} \times$$

$$\times \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\eta);$$

$$Y_{m,n} = \sum_{j=1}^{\beta} t_{m,n,j} [d_{n+j-1} (n+j-1)!]^{-1} \times$$

$$\times \sum_{k=0}^{n+j-1} a_k T_k^*(\eta), \quad (33)$$

где $\beta = n(q+3) - 2$.

Системы фундаментальных функций (33) являются равномерно сходящимися рядами, при этом коэффициенты $t_{m,\mu,n,j}$ и $t_{m,n,j}$ определяются через коэффициенты предыдущего приближения по рекуррентным формулам:

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

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

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

$$\prod_{\gamma=0}^r (n+j-1-\gamma). \quad (34)$$

Постоянные интегрирования C_{μ} , входящие в общее решение (32), находятся из граничных условий на свободных краях лопатки (21).

Пример расчета. Применим изложенный выше аналитический подход к расчету напряженного состояния рабочих лопаток осевых турбомашин. Лопатка находится под действием нормальной равномерно распределенной нагрузки – q и касательной нагрузки, действующей в срединной поверхности лопатки – p_1 .

Исходные данные для расчета: $l = 200$ мм; $b = 170$ мм; $h_0 = 10$ мм; $\psi_1 = 0,4$; $\varphi_0 = 33^\circ$; $q = 1$ кгс/см²; $p_1 = p_0(1-\xi)$; $p_0 = 210$ кгс/см². Материал лопатки: Сталь – 20.

На рис.5 приведены эпюры нормальных напряжений $\bar{\sigma}_{11}$ по длине, а на рис. 6 – эпюры $\bar{\sigma}_{11}$ по ширине лопатки. Как и следовало ожидать, наиболее напряженным является корневое сечение лопатки.

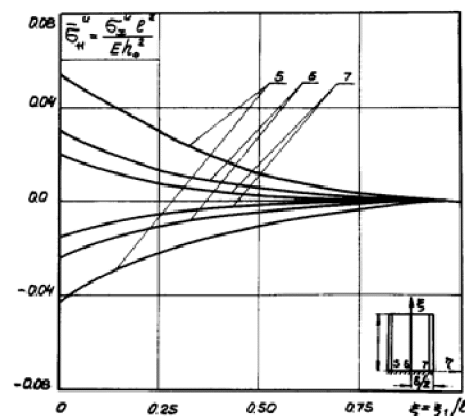


Рис. 5. Распределение нормальных напряжений $\bar{\sigma}_{11}$ по длине лопатки.

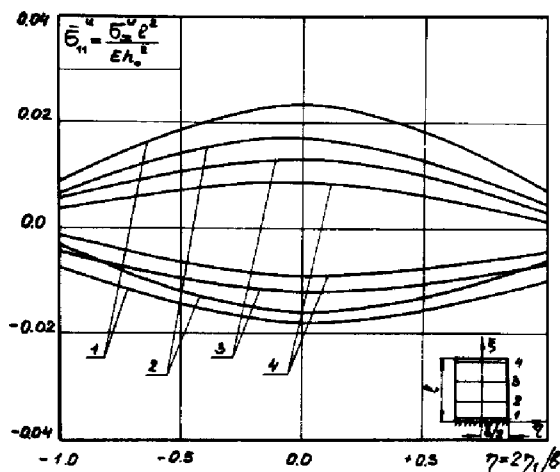


Рис. 6. Распределение нормальных напряжений $\bar{\sigma}_{11}$ по ширине лопатки.

Заключение

В настоящей работе рассматривается расчет на прочность рабочих лопаток осевых компрессоров воздушных турбохолодильных машин.

Разработана математическая модель расчета НДС естественно закрученных консольных лопаток осевых компрессоров на основе теории оболочек переменной жесткости. Исходная задача, описываемая системой дифференциальных уравнений в частных производных методом интегральных соотношений Дородницына приводится к системе обыкновенных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами, аналитическое решение, которой за тем строится модифицированным методом последовательных приближений, разработанным проф. В.А. Пухлий и изложенным им в академической печати [7-10].

Список литературы

1. Технологические установки с воздушными турбохолодильными машинами. Каталог. – М.: НИИХиммаш, 1991. – 32 с.
2. Меерович И.И. Распределение напряжений в компрессорных лопатках при колебаниях. – М.: Оборонгиз, 1961.
3. Бергер Ф.С. Исследование вибраций компрессорных лопаток. – В кн.: Прочность и динамика авиационных двигателей, вып.4. – М.: Машиностроение, 1966, с.132-142.
4. Рудавец В.А., Шорр Б.Ф. Расчет собственных частот и форм пространственных колебаний закрученных компрессорных лопаток. – В кн.: Теория оболочек и пластин. – М.: Наука, 1973, с.550-555.

5. Пухлий В.А., Поляков В.А. К расчету трехслойных естественно закрученных лопаток осевых турбомашин. – В кн.: Проблемы прочности и динамики в авиадвигателестроении. Труды ЦИАМ №996, 1982, с.115-128.
6. Бараненко А.В., Бухарин Н.Н., Пекарев В.И., Тимофеевский Л.С. Холодильные машины. – СПб: Изд-во «Политехника», 2006. -944 с.
7. Метод аналитического решения двумерных краевых задач для систем эллиптических уравнений. – 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. – Дифференциальные уравнения, 1979, том 15, №11, с.2039-2043.
9. Пухлий В.А. Решение начально-краевых задач математической физики модифицированным методом последовательных приближений. – Обзорение прикладной и промышленной математики, 2015, том 22, вып.4, с.493-495.
10. Пухлий В.А. Об ускорении сходимости решения в модифицированном методе последовательных приближений. – Обзорение прикладной и промышленной математики, 2016, том 23, вып.4, с.381-383.
11. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Журавлев А.А. Расчет рабочих лопаток турбодетандеров реактивного типа. – Теория механизмов и машин (ТММ), 2016, том 14, №4(32), с.194-201.
12. Пухлий В.А. Расчет напряженно-деформированного состояния деталей машин и механизмов из анизотропных материалов. – Современное машиностроение. Наука и образование: Материалы 5-й Международной научно-практической конференции. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – с.510-520.
13. Пухлий В.А., Мирошниченко С.Т., Журавлев А.А., Софийский И.Ю., Пухлий П.В. Гидродинамика и термоупругость турбодетандеров реактивного типа. – Современное машиностроение: Наука и образование: Материалы 6-й Международной научно-практической конференции. – 2017. СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2017.
14. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения. – М.: Мир, 1972. – 318 с.
15. Дородницын А.А. Об одном методе решения уравнений ламинарного пограничного слоя. – Журн. приклад. матем. и техн. физики, 1960, №3, с.111-118.
16. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximation. – New York. – London: Academic Press. Inc., 1975. – 608 p.

References

1. Technological installations with air turborefrigerators machine. The catalogue. - M: Niichimmach, 1991. - 32 p.

2. Meerovich I.I. Distribution of pressure in compressor blades at fluctuations. - M: Oborongis, 1961.
3. Berger F.S. Research vibrations compressor blades. - in book.: Durability and dynamics of aviation engines, rel.4. - M: Mechanical engineering, 1966, pp.132-142.
4. Rudavets V. A, Shorr B.F. Calculation of own frequencies and forms of spatial fluctuations to twist compressor blades. - in book.: The theory of shells and plates. - M: Science, 1973, pp.550-555.
5. Pukhliy V.A., Poljakov V.A. To calculation three-layer it is natural to twist blades axial turbomachines. - in book.: Durability and dynamics problems in air engine motors constructions. Works ZIAM №996, 1982, pp.115-128.
6. Baranenko A.V., Buharin N.N., Pekarev V. I, Timofeevsky L.S. Refrigerators. - SPb: Publishing house "Polytechnician", 2006.-944 p.
7. Pukhliy V.A. Metod of the analytical solution of two-dimensional regional tasks for systems of the elliptic equations. - Magazine Will calculate. mathem. and mathem. physics, 1978, vol. 18, №5, pp.1275-1282.
8. Pukhliy V. A. About one solution to the decision of regional problems of mathematical physics. - Differential equations, 1979, vol. 15, №11, pp.2039-2043.
9. Pukhliy V. A. The decision of nachalno-regional problems of mathematical physics the modified method consecutive approaches. - Review of applied and industrial mathematics, 2015, vol. 22, rel.4, pp.493-495.
10. Pukhliy V. A. About acceleration descend pave decisions in the modified method consecutive approaches. - Review of applied and industrial mathematics, 2016, vol. 23, rel.4, pp.381-383.
11. Pukhliy V. A, Miroshnichenko S.T., Zhu-ravlyov A.A. The calculation of the working blades of expansion turbines jet type. - Theory of mechanisms and cars (TMM), 2016, vol. 14, №4 (32), pp.194-201.
12. Pukhliy V. A. Calculation of the is intense-deformed state of details of cars and mechanisms from anisotropic materials. - Modern mechanical engineering. Materials of 5th International scientifically-practical conference.- SPb.: Publishing house Politehn. Un y, 2016.- pp.510-520.
13. Pukhliy V. A, Miroshnichenko S.T., Zhuravlev A.A., Sofijskiy I.J., Pukhliy P.V. Hidrodinamika and thermoelasticity expansion turbines jet type. - Modern mechanical engineering. Materials of 6th International scientifically-practical conference. - SPb: Publishing house Politehn. Un-y, 2017.
14. Alberg J., Nilson E., Uolch J. The theory of splines and its appendix. - M: The World, 1972. - 318 p.
15. Dorodnicyn A.A. On one method of solving equations of the laminar boundary. - Magazine appl. mathemat. and tekhn. physics, 1960, №3, pp.111-118.
16. Luke Y.L. Mathematical functions and their approximation. - New York. - London: Academic Press. Inc., 1975. - 608 p.

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-50(07)

Исследование абсолютной устойчивости нелинейных аналоговых систем автоматического регулированияЮ.Г. Дикусар¹, М.Б. Сулейменова², В.Д. Богушева³, А.В. Вольнова⁴

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹dikusar@list.ru, ²miroslava13_03@mail.ru, ³bloodrain224@mail.ru,
⁴ms.nastya.volnova@mail.ru

Статья поступила 11.04.2017 г.; после доработки 13.04.2017 г.

Аннотация

В статье выполнено исследование абсолютной устойчивости нелинейной аналоговой системы автоматического регулирования. Рассмотрены методы коррекции линейной части системы и параметров статической характеристики нелинейного элемента. Определены диапазоны изменения коэффициента передачи нелинейной системы автоматического регулирования, для обеспечения ее абсолютной устойчивости.

Ключевые слова: нелинейная аналоговая система автоматического регулирования, абсолютная устойчивость, коррекция, линейная часть, статическая характеристика нелинейного элемента.

Research of the absolute stability of nonlinear analog automatic control systemsYu.G. Dikusar¹, M.B. Suleimenova², V.D. Bogusheva³, A.V. Volnova⁴

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹dikusar@list.ru, ²miroslava13_03@mail.ru, ³bloodrain224@mail.ru
⁴ms.nastya.volnova@mail.ru

Received 11.04.2017 y.; received in final form 13.04.2017 y.

Abstract

In article the analysis of non-linearities in discrete systems of automatic control is made. The method of discrete trajectories of a state is considered. Construction and the analysis of discrete trajectories of a condition of non-linear discrete system of automatic control on the phase plane are executed.

Keywords: non-linear discrete system of automatic control, discrete transfer function, differential equation, phase plane, discrete trajectories of a state.

Введение

Системы автоматического регулирования (САР) и их элементы не всегда могут быть описаны линейными дифференциальными уравнениями. В ряде случаев объект или регулятор имеют нелинейные статические характеристики, а иногда нелинейные свойства проявляются в динамике. Реальные элементы автоматических

систем, строго говоря, в большинстве случаев нелинейны, и лишь в определенных пределах их можно считать линейными.

Нелинейные системы обладают особенностями, которые не свойственны линейным системам. Процессы в нелинейных системах автоматического регулирования и собственные их движения гораздо разнообразнее и сложнее

процессов и движений в линейных системах. Более того, в нелинейных системах появляются режимы, невозможные в линейных системах.

Особые свойства нелинейных систем широко используются в технике. На этих свойствах основано генерирование электромагнитных колебаний, выпрямление переменного тока, умножение и деление частот, и другие процессы. Существует большое число нелинейных автоматических систем, в которых рационально используются нелинейные характеристики отдельных элементов и на этой основе получают хорошие практические результаты. Однако в некоторых случаях нелинейные характеристики являются вредными факторами. Их надо либо устранять, либо выбирать режим работы таким образом, чтобы нелинейности не оказывали существенного влияния на процессы в системе.

Задачи анализа и синтеза нелинейных систем решаются значительно сложнее, чем Из-за сложности математического аппарата теория нелинейных систем автоматического регулирования не даёт для практики столь же эффективных методов расчёта, какие имеются в теории линейных систем.

Если нелинейности слабо выражены, то поведение нелинейной системы незначительно отличается от поведения близкой к ней линейной системы. В таких случаях для исследования нелинейных систем прибегают к линеаризации нелинейностей. Если же нелинейности являются существенными, то получение линейной модели становится затруднительным, а сама модель может не сохранять некоторых важных свойств оригинала. Поэтому требуется применение специальных методов исследования нелинейных систем [1-3].

Особенности поведения нелинейных систем и многообразие процессов в них создают трудности точного их математического описания и теоретического изучения. Поэтому задачи исследования нелинейных систем автоматического регулирования, несравненно более трудные, чем задачи исследования линейных систем, приобретают в современной технике актуальное значение.

Постановка цели научной работы

Задачей исследования является определение абсолютной устойчивости нелинейных систем автоматического регулирования с различными видами задания нелинейности и анализ возможности коррекции системы для обеспечения ее устойчивости.

Абсолютная устойчивость нелинейных систем автоматического регулирования

Процессы в нелинейных САР имеют целый ряд весьма существенных особенностей, которые не встречаются в линейных системах, поэтому вопрос об устойчивости нелинейной системы является более сложным. Кроме структуры системы и значений её параметров устойчивость того или иного установившегося процесса в нелинейных САР, в отличие от линейных систем, зависит от начальных условий. Понятие устойчивости для нелинейных САР гораздо шире и объемнее, чем понятие устойчивости для линейных (линеаризованных) систем.

В отличие от линейных систем, одна и та же нелинейная система может быть устойчивой в одних режимах и неустойчивой в других режимах. Поэтому нельзя говорить об устойчивости или неустойчивости нелинейной системы вообще, а можно говорить только об устойчивости или неустойчивости различных режимов движения (работы) нелинейной системы, её статического или динамического режима, т.е. определенного состояния системы или её движения при отклонениях от него. В связи с этим при изучении нелинейных систем употребляются понятия устойчивости «в малом», «в большом», «в целом» и «абсолютной устойчивости».

Абсолютная устойчивость – это устойчивость в целом (при любых больших начальных отклонениях) нелинейной системы при задании ее нелинейности принадлежностью к определенному классу. Это означает задание нелинейности не конкретной характеристикой, а в более общем виде – с точностью только до определения ее класса [1-3].

Примером такого определения нелинейности является задание статической нелинейной характеристики $y = F(x)$ условием, что она может иметь любую однозначную форму, но должна находиться в пределах определенного угла $\alpha = \arctg k$ ($0 < k < \infty$), образованного осью абсцисс и некоторой прямой $y = kx$, проходящей через начало координат, как показано на рис. 1. При этом конкретная форма характеристики может быть любой, в том числе и непостоянной. Для всех x выполняется условие $0 < F(x) < kx$, то есть статическая нелинейная характеристика располагается в пределах угла $(0, k)$, где 0 и k тангенсы углов наклона линий, ограничивающих этот угол.

Условия абсолютной устойчивости нелинейных систем исследованы в основном приме-

нительно к нелинейностям, заданным именно таким образом, то есть в угле. Исследование устойчивости нелинейной САР при таком неконкретном задании нелинейности вызвано не только чисто математическими соображениями (с целью упрощения решения задач), но и теми практическими соображениями, что нелинейности могут быть известны не точно или могут изменяться.

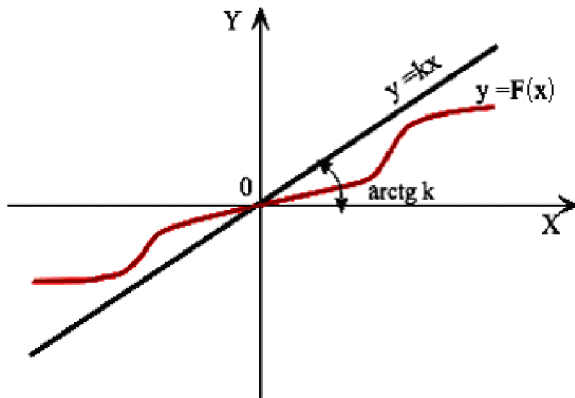


Рис. 1. Задание нелинейности в угле.

Определение абсолютной устойчивости и коррекция нелинейной системы автоматического регулирования с устойчивой линейной частью

Единственным общим методом точного исследования динамики и устойчивости нелинейных САР является метод фазовых траекторий. На основе методов исследования устойчивости нелинейных систем, разработанных А. М. Ляпуновым, получен представляющий практический интерес достаточный критерий устойчивости В. М. Попова [1-3].

Критерий абсолютной устойчивости В. М. Попова применим к нелинейным САР, структурные схемы которых можно представить в виде, изображенном на рис. 2.



Рис. 2. Структурная схема нелинейной системы.

Нелинейная САР на рис. 2 состоит из устойчивой линейной части с передаточной функцией $W(S)$ и нелинейного элемента с однозначной характеристикой $y=F(x)$, лежащей в угле $(0, k)$. Для определения абсолютной устойчивости используется преобразованная (видоизмененная) частотная характеристика линейной части системы

$$W^*(j\omega) = P^*(\omega) + jQ^*(\omega),$$

где $P^*(\omega) = \operatorname{Re} W(j\omega)$;

$Q^*(\omega) = \omega \operatorname{Im} W(j\omega)$, то есть преобразованная АФЧХ линейной части системы $W^*(j\omega)$ получается из АФЧХ линейной части $W(j\omega)$ путем умножения ее ординат на текущее значение частоты ω .

Тогда критерий абсолютной устойчивости В.М. Попова формулируется следующим образом: для абсолютной устойчивости системы с устойчивой линейной частью и одним нелинейным элементом, статическая характеристика которого лежит в секторе $(0; \arctg k)$, достаточно, чтобы на плоскости преобразованной АФЧХ $W^*(j\omega)$ через точку $(-1/k; j0)$ можно было провести прямую (прямую Попова) так, чтобы вся характеристика $W^*(j\omega)$ находилась справа от этой прямой.

Исследование абсолютной устойчивости нелинейной САР частотным методом В.М. Попова и коррекцию системы, если известна статическая характеристика нелинейного элемента, можно проводить в следующем порядке:

- 1) проверяется устойчивость линейной части разомкнутой САР; если она неустойчива, производится коррекция системы (например, уменьшением коэффициента усиления k_n);
- 2) коэффициенты передачи линейной части системы и нелинейного элемента $k = k_n k_n$ условно относятся к нелинейному элементу; коэффициенты передачи различных нелинейных (релейных) элементов представлены в таблице 1;
- 3) в частотной функции линейной части разомкнутой САР $W_n(j\omega)$ выделяется вещественная $P(\omega)$ и мнимая $Q(\omega)$ части и вводится преобразованная частотная функция линейной части системы

$$W_n^*(j\omega) = P^*(\omega) + jQ^*(\omega),$$
 где $P^*(\omega) = P(\omega)$; $Q^*(\omega) = \omega Q(\omega)$;
- 4) на комплексной плоскости строится преобразованная АФЧХ линейной части САР $W_n^*(j\omega)$;
- 5) через точку с координатами $(-1/k; j0)$ про-

водится прямая линия (прямая Попова) так, чтобы преобразованная АФХ линейной части системы целиком лежала справа от этой прямой - в этом случае нелинейная САР является абсолютно устойчивой; в случае неустойчивости системы производится её коррекция уменьшением коэффициента усиления нелинейного элемента k_n (за счет изменения параметров статической характеристики);

- б) статическая характеристика нелинейного элемента для абсолютно устойчивой САР должна целиком помещаться в секторе $(0; \arctg k)$.

Таблица 1. Коэффициенты передачи нелинейных элементов

Тип нелинейного элемента	Коэффициент передачи k_n
Двухпозиционное реле	C
Трёхпозиционное реле	$\frac{C}{b}$
Зона нечувствительности	$\lg \alpha$
Зона насыщения	$\frac{C}{b}$

Рассмотрим нелинейную САР, у которой:

- передаточная функция линейной части разомкнутой системы

$$W_{лч}(S) = \frac{6}{S(S+1)(2S+1)};$$

- нелинейный элемент типа “трёхпозиционное реле” с параметрами статической характеристики $C = 8,35; b = 5,0$.

Определим:

- абсолютную устойчивость нелинейной САР (в случае неустойчивости системы произведем её коррекцию);
- диапазон изменения коэффициента передачи системы, при котором система обладает абсолютной устойчивостью.

Проверяем устойчивость линейной части разомкнутой САР с помощью корневого условия устойчивости. Характеристическое уравнение системы

$$S(S+1)(2S+1) + 6 = 0;$$

$$S^3 + 3S^2 + S + 6 = 0.$$

Корни характеристического уравнения САР

$$S_1 = -2; S_{2,3} = +0,25 \pm j1,2.$$

По корневому условию устойчивости линейная часть разомкнутой САР является не-

устойчивой (имеются корни с положительной вещественной частью). Выполним коррекцию САР уменьшением коэффициента усиления k_n в 5 раз (с 6 до 1,2). Тогда характеристическое уравнение системы

$$S^3 + 3S^2 + S + 1,2 = 0$$

имеет корни

$$S_1 = -1,26; S_{2,3} = -0,12 \pm j0,43.$$

После коррекции линейная часть САР стала устойчивой.

Коэффициент передачи нелинейного элемента типа «трёхпозиционное реле» (по таблице 1)

$$k_{нэ} = \frac{c}{b} = \frac{8,35}{5,0} = 1,67.$$

Коэффициенты передачи линейной части системы $k_{лч} = 1,2$ и нелинейного элемента условно отнесём к нелинейному элементу

$$k = k_{лч} \cdot k_{нэ} = 1,2 \cdot 1,67 = 2,0.$$

Частотная функция линейной части системы

$$W_{лч}(j\omega) = \frac{1}{j\omega(j\omega+1)(2j\omega+1)} = \frac{1}{j\omega(1-2\omega^2+j3\omega)} = \frac{1}{j\omega - j2\omega^3 - 3\omega^2} = -\frac{1}{3\omega^2 + j(2\omega^3 - \omega)}.$$

Для выделения вещественной и мнимой частей умножим числитель и знаменатель частотной функции на выражение, сопряженное знаменателю

$$W_{лч}(j\omega) = -\frac{3\omega^2 - j(2\omega^3 - \omega)}{(3\omega^2 + j(2\omega^3 - \omega)) \cdot (3\omega^2 - j(2\omega^3 - \omega))} = -\frac{3\omega^2 - j(2\omega^3 - \omega)}{(3\omega^2)^2 - (j(2\omega^3 - \omega))^2} = -\frac{3\omega^2 - j(2\omega^3 - \omega)}{9\omega^4 + (2\omega^3 - \omega)^2}.$$

Вещественная и мнимая части функции

$$P_{лч}(\omega) = -\frac{3\omega^2}{9\omega^4 + (2\omega^3 - \omega)^2} = -\frac{3}{9\omega^2 + (2\omega^2 - 1)^2};$$

$$Q_{лч}(\omega) = \frac{2\omega^3 - \omega}{9\omega^4 + (2\omega^3 - \omega)^2} = \frac{2\omega^2 - 1}{9\omega^2 + (2\omega^2 - 1)^2}.$$

Введём преобразованную частотную функцию линейной части САР $W_{лч}^*(j\omega)$, которая имеет следующие вещественную и мнимую части

$$P_{лч}^*(\omega) = P_{лч}(\omega) = -\frac{3}{9\omega^2 + (2\omega^2 - 1)^2};$$

$$Q_{лч}^*(\omega) = \omega \cdot Q_{лч}(\omega) = \frac{2\omega^2 - 1}{9\omega^2 + (2\omega^2 - 1)^2}.$$

Задаемся значениями частоты ω от 0 до ∞ , определяем соответствующие значения

$P_{лч}^*(\omega)$ и $Q_{лч}^*(\omega)$ (таблица 2) и на комплексной плоскости строим преобразованную АФЧХ линейной части системы $W_{лч}^*(j\omega)$ (рис. 3).

Таблица 2. Значения вещественной и мнимой частей преобразованной частотной функции линейной части системы

ω	0	0,1	0,5	0,71	1,0	1,5	∞
$P_{лч}^*(\omega)$	-3	-2,86	-1,2	-0,67	-0,3	-0,09	0
$Q_{лч}^*(\omega)$	-1	-0,93	-0,2	0	0,1	0,11	0

Найдём координаты точки пересечения графика $W_{лч}^*(j\omega)$ с отрицательной вещественной полуосью. В этой точке

$$Q_{лч}^*(j\omega) = \frac{2\omega^2 - 1}{9\omega^2 + (2\omega^2 - 1)^2} = 0.$$

Отсюда $2\omega^2 - 1 = 0$; $\omega = \sqrt{0,5} = 0,71$.

При $\omega = 0,71$.

$$P_{лч}^*(j\omega) = -\frac{3}{9\omega^2 + (2\omega^2 - 1)^2} = -0,67.$$

Поэтому график $W_{лч}^*(j\omega)$ пересекает отрицательную вещественную полуось в точке с координатами $(-0,67; 0)$ (рис. 3).

На отрицательной вещественной полуоси изобразим точку с координатами $(-\frac{1}{k} = -\frac{1}{2} = -0,5; 0)$ – точка A на рис. 3.

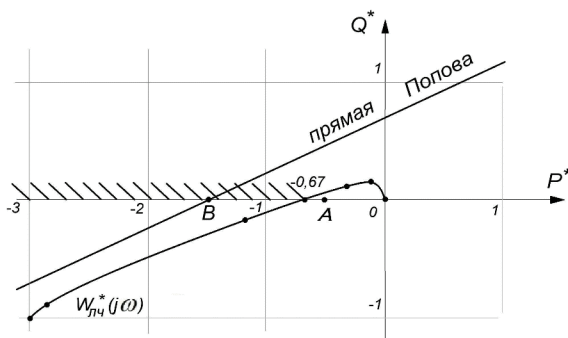


Рис. 3. Преобразованная АФЧХ линейной части САР.

Через точку A нельзя провести прямую Попова так, чтобы преобразованная АФХ лежала справа от этой прямой, поэтому нелинейная САР не является абсолютно устойчивой и статическая характеристика нелинейного элемента не помещается в

секторе $(0; \arctg k = \arctg 2 = 63^\circ)$ (на рис. 4 заштрихован).

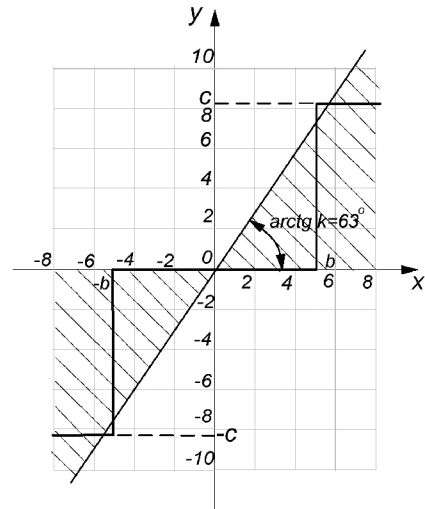


Рис. 4. Статическая характеристика нелинейного элемента и сектор абсолютной устойчивости САР.

Для того, чтобы нелинейная САР стала абсолютно устойчивой необходимо, чтобы точка с координатами $(-\frac{1}{k}; 0)$ лежала на отрицательной вещественной полуоси левее точки пересечения графика $W_{лч}^*(j\omega)$ с полуосью, то есть левее точки с координатами $(-0,67; 0)$ (точка B с координатами $(-1,5; 0)$ на рис. 3).

Через точку B может быть проведена прямая Попова (рис. 3).

Координатам точки B соответствует коэффициент передачи нелинейного элемента

$$-\frac{1}{k} = -1,5; \quad k = \frac{1}{1,5} = 0,67; \quad k = k_{лч} \cdot k_{нэ} = 0,67,$$

так как $k_{лч} = 1,2$,

$$k_{нэ} = \frac{0,67}{k_{лч}} = \frac{0,67}{1,2} = 0,56.$$

Поэтому, чтобы нелинейная САР стала абсолютно устойчивой, необходимо произвести коррекцию системы за счёт уменьшения коэффициента передачи нелинейного элемента (от $k_{нэ} = 1,67$ до $k_{нэ} = 0,56$). Так как для «трёхпозиционного реле» $k_{нэ} = \frac{C}{b}$, уменьшение коэф-

фициента передачи нелинейного элемента достигается изменением параметров его статической характеристики: уменьшением параметра C или увеличением параметра b .

Так, в заданном нелинейном элементе значение параметра $b=5$, а значение параметра C уменьшим от $C=8,35$ до $C=2,8$. В результате значение коэффициента передачи нелинейного элемента

$$k_{нэ} = \frac{C}{b} = \frac{2,8}{5} = 0,56.$$

В этом случае нелинейная САР станет абсолютно устойчивой и статическая характеристика скорректированного нелинейного элемента с параметрами $C=2,8$; $b=5$ будет полностью располагаться в секторе $(0; \arctg k = \arctg 0,67 = 34^\circ)$, как показано на рис. 5.

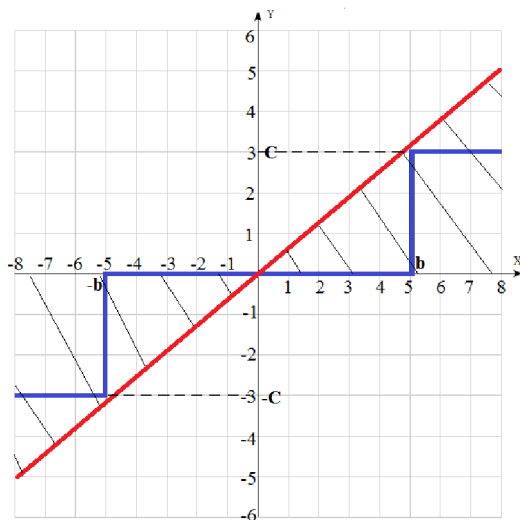


Рис. 5. Статическая характеристика скорректированного нелинейного элемента и сектор абсолютной устойчивости САР.

Для того, чтобы нелинейная САР была абсолютно устойчивой необходимо, чтобы точка с координатами $(-\frac{1}{k}; 0)$ лежала на отрицательной вещественной полуоси левее точки пересечения графика $W_{лч}^*(j\omega)$ с полуосью, то есть левее точки с координатами $(-0,67; 0)$ (на рис. 3 эта область заштрихована)

$$-\infty < -\frac{1}{k} < -0,67.$$

Это условие позволяет определить диапазон изменения коэффициента передачи системы, при котором нелинейная САР обладает абсолютной устойчивостью

$$\infty > \frac{1}{k} > 0,67; \quad \frac{1}{\infty} < k < \frac{1}{0,67}; \quad 0 < k < 1,49.$$

Определение абсолютной устойчивости и коррекция нелинейной системы автоматического регулирования с неустойчивой линейной частью

Если линейная часть САР неустойчива, преобразуем структурную схему системы, как показано на рис. 6, дополнив структуру исследуемой САР одной прямой и одной обратной связью, введя в структурную схему системы два фиктивных звена с передаточными функциями k_ϕ .

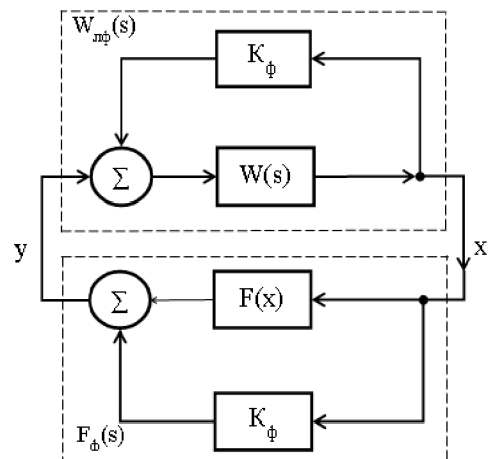


Рис. 6. Преобразованная структурная схема нелинейной системы.

Сигналы от введенных связей компенсируют друг друга, поэтому система не изменит своих свойств. В результате выполненных преобразований у системы получается новая линейная часть с передаточной функцией

$$W_{лч}(S) = \frac{W(S)}{1 + k_\phi W(S)}$$

и новая нелинейная часть с характеристикой $F_\phi(x) = F(x) - k_\phi x$.

Коэффициент передачи k_ϕ выбирается таким образом, чтобы новая линейная часть системы, получаемая за счет введения жесткой отрицательной обратной связи вокруг звена с передаточной функцией $W(S)$, стала устойчивой (если это невозможно, то абсолютная устойчивость в системе не достигается).

Тогда критерий абсолютной устойчивости В.М. Попова для нелинейной САР с неустойчивой линейной частью формулируется следующим образом: для абсолютной устойчивости системы с неустойчивой линейной частью достаточно, чтобы на плоскости преобразованной

АФЧХ $W_{\text{ЛФ}}^*(j\omega)$ через точку $(-\frac{1}{k-k_\phi}; j0)$

можно было провести прямую линию (прямую Попова) так, чтобы вся характеристика $W_{\text{ЛФ}}^*(j\omega)$ находилась справа от этой прямой (при этом k по-прежнему определяется углом, в пределах которого должна лежать нелинейная характеристика $F(x)$).

Так как нелинейная характеристика $F_\phi(x)$ должна находиться в пределах угла $(0; k-k_\phi)$, то характеристика $F(x)$ при этом будет лежать в пределах угла $(k_\phi; k)$, как представлено на рис. 7.

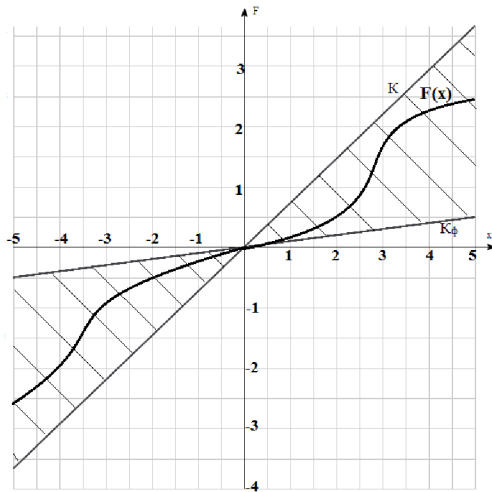


Рис. 7. Статическая характеристика нелинейности $F(x)$.

Так, для рассмотренной выше нелинейной САР, имеющей неустойчивую линейную часть с передаточной функцией

$$W(S) = \frac{6}{S(S+1)(2S+1)},$$

введем в структурную схему системы два фиктивных звена с передаточными функциями $k_\phi=0,2$ (как показано на рис. 6). Такое значение коэффициент передачи k_ϕ обеспечит устойчивость новой линейной части с передаточной функцией

$$W_{\text{ЛФ}}(S) = \frac{W(S)}{1+k_\phi W(S)} = \frac{\frac{6}{S(S+1)(2S+1)}}{1+0,2 \frac{6}{S(S+1)(2S+1)}} = \frac{6}{S(S+1)(2S+1)+1,2}.$$

Частотная функция линейной части системы

$$W_{\text{ЛФ}}(j\omega) = -\frac{6}{(3\omega^2+1,2) + j(2\omega^3-\omega)} = \frac{6[(3\omega^2+1,2) - j(2\omega^3-\omega)]}{(3\omega^2+1,2)^2 - [j(2\omega^3-\omega)]^2} = -\frac{(18\omega^2+7,2) - j(12\omega^3-6\omega)}{(3\omega^2+1,2)^2 + (2\omega^3-\omega)^2}.$$

Преобразованная частотная функция линейной части САР $W_{\text{ЛФ}}^*(j\omega)$ имеет следующие вещественную и мнимую части

$$P_{\text{ЛФ}}^*(\omega) = -\frac{18\omega^2+7,2}{(3\omega^2+1,2)^2 + (2\omega^3-\omega)^2};$$

$$Q_{\text{ЛФ}}^*(\omega) = \frac{12\omega^4-6\omega^2}{(3\omega^2+1,2)^2 + (2\omega^3-\omega)^2}.$$

Задаваясь значениями частоты ω от 0 до ∞ , определяем соответствующие значения $P_{\text{ЛФ}}^*(\omega)$ и $Q_{\text{ЛФ}}^*(\omega)$ (таблица 3) и на комплексной плоскости строим преобразованную АФЧХ новой линейной части системы $W_{\text{ЛФ}}^*(j\omega)$ (рис. 8).

Таблица 3. Значения вещественной и мнимой частей преобразованной частотной функции новой линейной части системы

ω	0	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8	1
$P_{\text{ЛФ}}^*(\omega)$	-5	-4,5	-3,56	-3,08	-2,6	-1,88	-1,35
$Q_{\text{ЛФ}}^*(\omega)$	0	-0,13	-0,23	-0,2	-0,12	0,11	0,32

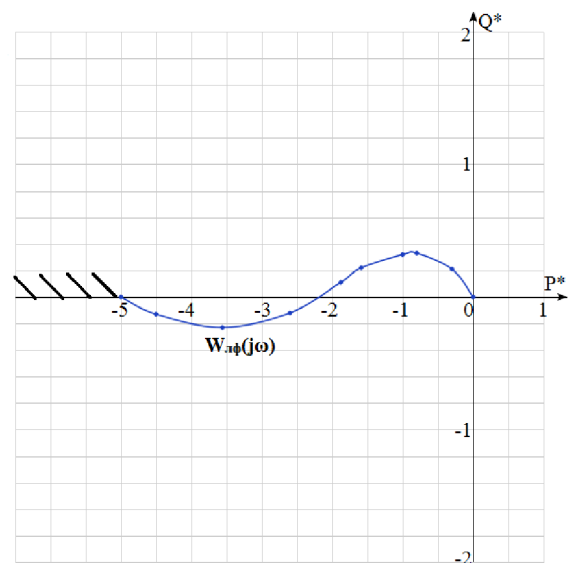


Рис. 8. Преобразованная АФЧХ новой линейной части САР.

Для того, чтобы нелинейная САР была абсолютно устойчивой необходимо, чтобы точка с координатами $(-\frac{1}{k-k_\phi}; j0)$ лежала на отрицательной вещественной полуоси левее точки пересечения графика $W_{\text{ЛФ}}^*(j\omega)$ с полуосью, то есть левее точки с координатами $(-5,0;0)$ (на рис. 8 эта область заштрихована)

$$-\frac{1}{k-k_\phi} = -\frac{1}{k-0,2} < -5,0,$$

то есть

$$\frac{1}{k-0,2} > 5,0.$$

Это условие позволяет определить диапазон изменения коэффициента передачи системы, при котором нелинейная САР обладает абсолютной устойчивостью $k < 0,4$.

Поэтому нелинейная характеристика $F(x)$ будет лежать в пределах угла

$$\arctg k_\phi = \arctg 0,2 = 11,3^\circ;$$

$$\arctg k = \arctg 0,4 = 21,8^\circ$$

как представлено на рис. 9.

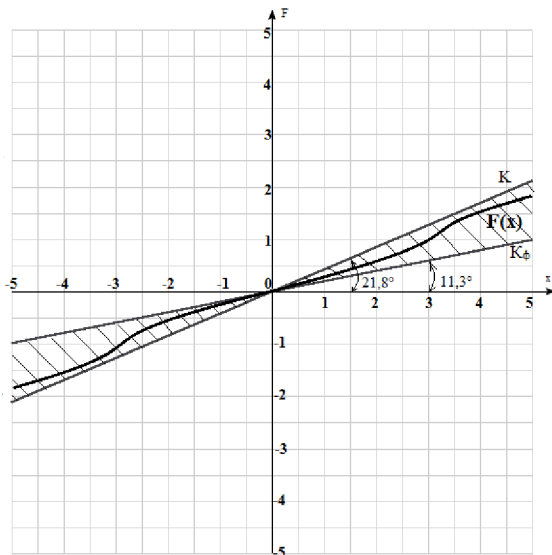


Рис. 9. Статическая характеристика нелинейности $F(x)$.

Заключение

В процессе проведения исследования было выполнено:

1. определение абсолютной устойчивости нелинейной САР с использованием частотного критерия В. М. Попова;

2. коррекция передаточной функции линейной части системы;
3. коррекция параметров статической характеристики нелинейного элемента;
4. определение диапазона изменения коэффициента передачи системы, при котором нелинейная САР обладает абсолютной устойчивостью.

Список литературы

1. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – 3-е изд. – СПб.: БХВ-Петербург, 2007. – 560 с.: ил.
2. Суевалов Л.Ф. Справочник по расчетам судовых автоматических систем. – 2-е изд. – Л.: Судостроение, 1989. – 408 с.: ил.
3. Нетушил А.В., Балтрушевич А.В., Бурляев В.В. и др.; Под ред. А.В. Нетушила. Теория автоматического управления: Нелинейные системы. – 2-е изд. – М.: Высш. школа, 1983. – 432 с.: ил.

References

1. Yurevich E. I. Theory of automatic control. – 3rd prod. – SPb.: BHV-St. Petersburg, 2007. – 560 p.: ill.
2. Suyevalov L. F. Reference book on calculations of ship automatic systems. – 2nd prod. – L.: Shipbuilding, 1989. – 408 p: ill.
3. Netushil AV, Baltrushevich AV, Burlyaev VV and etc.; Ed. A.V. Netushila. Theory of automatic control: Nonlinear systems. - 2 nd ed. - M.: Higher education. School, 1983. - 432 p: ill.

УДК 621.039.56

Модель функционирования системы наведения перегрузочных машин АЭС на основе сетей Петри

С.А. Качур¹, Н.В. Шахова², А.А. Халина³

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kachur_62@mail.ru, ²nata_shachova_73@mail.ru,
³halina Bakanov_dan@yandex.ru

Статья поступила 04.04.2017 г.; после доработки 05.04.2017 г.

Аннотация

Предложен подход к исследованию перегрузочной машины как сложной стохастической системы на основе математического аппарата сетей Петри. Разработана сетевая модель системы наведения перегрузочных машин. Способности моделей на базе сетей Петри к самообучению при автоматическом наведении перегрузочной машины позволяет сократить сроки работ по перегрузке ядерного топлива и повысить безопасность этих работ.

Ключевые слова: перегрузочная машина, реактор, система наведения, модель, сети Петри.

Functioning Model of the Aiming System of Shifting Machines of APP on the basis of the Petry Nets

S.A. Kachur, N.V. Shahova, A.A. Halina

Sevastopol state university, 33, Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, ¹kachur_62@mail.ru,
²nata_shachova_73@mail.ru, ³halina Bakanov_dan@yandex.ru

Received 04.04.2017 y.; received in final form 05.04.2017 y.

Abstract

Offered approach to research of shifting machine as difficult stochastic system on the basis of mathematical vehicle of the Petry nets. The network model of the aiming system of shifting machines is developed. On the base of the Petry nets to self-training at the automatic aiming of shifting machine allows the capabilities of models to reduce the terms of works on the overload of nuclear fuel and extend safety of these works.

Keywords: machine, reactor, aiming system, model, the Petry nets.

Введение

Безопасность работ при транспортировке, перегрузке и хранению тепловыделяющих сборок (ТВС) обеспечивается высокой профессиональной квалификацией персонала и степенью автоматизации систем перегрузочных машин [1, 2].

На выбор системы наведения большое влияние оказывает конструкция активной зоны реактора. В тех случаях, когда местоположение каждого канала является строго постоянным, можно состав-

вить точную картину расположения каналов. В этом случае выбор системы наведения не вызывает сколько-нибудь серьезных затруднений. Иначе обстоит дело, когда положение каналов неизвестно и под действием тепловых и физических напряжений каждый канал отходит от своего начального положения. В настоящее время актуальна разработка систем автоматизации с элементами интеллектуального управления. Одним из подходов при решении задач автоматизации управления сложными стохастическими системами и процессами

является использование математического аппарата сетей Петри (СП) [3].

В работе используются возможности данного аппарата для описания процесса наведения перегрузочных машин реакторов типа ВВЭР. При автоматическом наведении перегрузочной машины использование способности моделей на базе СП к самообучению позволяет сократить сроки работ по перегрузке ядерного топлива и, следовательно, повысить безопасность этих работ. В процессе функционирования перегрузочной машины за счет изменения шага дискретизации при обучении СП автоматически повышается точность наведения.

При дистанционном наведении необходимо, чтобы оператор быстро определял шаг и направление движения для вывода перегрузочной машины в точку с заданными координатами в активной зоне или хранилище отработавших ТВС. Подобные навыки развивает предлагаемая программная система тренинга.

Цель и задачи исследования

Целью исследования является создание модели функционирования перегрузочной машины АЭС с реакторами типа ВВЭР для повышения точности и сокращения времени наведения с использованием математического аппарата сетей Петри.

Для реализации поставленной цели необходимо решить следующие задачи: 1) выполнить анализ особенностей функционирования систем наведения перегрузочных машины для реакторов типа ВВЭР; 2) определить конкретный математический аппарат, позволяющий описывать сложные стохастические объекты, к которым относятся и перегрузочная машина ВВЭР; 3) разработать модель функционирования системы наведения перегрузочной машины ВВЭР на основе выбранного математического аппарата.

Особенности систем перегрузки ядерного топлива на энергоблоке с ВВЭР

Перегрузка ядерного топлива (ЯТ) на энергоблоке (ЭБ) с ВВЭР осуществляется при полностью остановленном ядерном реакторе (ЯР) и обычно совмещается с ремонтом оборудования ЭБ для ВВЭР перегрузка ЯТ имеет две важные особенности [1]:

- 1) перегрузка топлива связана с изменением геометрии активной зоны ЯР;
- 2) перегрузка топлива оказывает особое влияние на остаточное тепловыделение в активной зоне ЯР.

Первая особенность во многом определяет ядерную безопасность ЭБ, а вторая требует организации сложных технологических систем охлаждения из-за необходимости сохранения в работе тепломеханического и электромеханического оборудования, насосов, средств и приборов контроля.

Для построения модели в качестве примера рассмотрим особенности работы перегрузочной машины без контейнера с подвижным скафандром [4]. Перегрузочная машина с такой компоновкой установлена на реакторе МЗФР в ФРГ. Ее компоновка напоминает компоновку перегрузочной машины АЭС «Хартлпул». Отличие заключается в том, что перегрузочная машина реактора МЗФР не имеет контейнера биологической защиты и поэтому скафандр подвешен к тележке реакторного крана на шести гидроцилиндрах, рабочей жидкостью в которых является теплоноситель реактора.

Во время процесса перегрузки реактора перегрузочная машина совершает перемещения по перегрузочной площадке реактора между технологическими каналами, осуществляя стыковку с ними. Операция стыковки перегрузочной машины с технологическими каналами ядерного реактора – одна из наиболее сложных операций технологического процесса перегрузки топлива. Она состоит из нескольких переходов: выход к определенному технологическому каналу с заданной точностью, стыковка с технологическим каналом, уплотнение и разуплотнение с технологическим каналом после удаления отработанного и установки свежего топлива.

Для осуществления стыковки перегрузочная машина должна выйти с определенной точностью на заданную координату, при этом операционное время выхода на координату необходимо выдерживать с учетом оптимальных возможностей физического принципа выхода на координату. Контейнер перегрузочной машины должен быть точно выверен с технологическими каналами реактора до начала операции по перегрузке, так как передача больших радиальных сил на каналы недопустима. Кроме того, тепловыделяющая сборка может иметь большую длину (около 18 м), и несовпадение оси технологического канала с осью гнезда магазина перегрузочной машины может быть причиной повреждения тепловыделяющей сборки при ее извлечении из канала реактора вследствие чрезмерного ее изгиба.

На выбор системы наведения большое влияние оказывает конструкция активной зоны реактора. В тех случаях, когда местоположение каждого канала является строго постоянным, можно составить точную картину расположения каналов. В этом случае выбор системы наведения не вызывает сколько-нибудь серьезных затруднений. Иначе

обстоит дело, когда положение каналов неизвестно и под действием тепловых и физических напряжений каждый канал отходит от своего начального положения.

С целью сокращения перегрузочного цикла путем уменьшения времени выхода перегрузочной машины на заданную координату и для достижения более точного совмещения оси канала реактора с осью гнезда магазина перегрузочной машины систему наведения, как правило, проектируют двухступенчатой. Первая ступень – это грубый выход на координату, вторая ступень – ступень точного выхода.

Выбор системы наведения оказывает влияние на конструкцию перегрузочной машины. Ниже рассмотрены следующие системы наведения:

1. система точного наведения перегрузочной машины с применением аналогового и цифрового управляющих устройств;
2. система точного наведения перегрузочной машины с применением отклоняющей электромеханической системы;
3. система точного наведения перегрузочной машины с применением оптико-телевизионной системы и системы реперов.

Рассмотрим первый тип систем систему аналогового и цифрового управления.

В патенте ФРГ приведены описание и схема системы точного выхода перегрузочной машины на заданную координату в прямоугольной системе координат. Для каждого направления координат предусмотрен свой привод. При этом для каждого привода существуют два различных независимых друг от друга управляющих устройства. Оба эти устройства работают параллельно с разной точностью и оснащены спаренными датчиками, которые содержат сопротивления, соответствующие рабочим позициям, или установочные устройства для заданного числа импульсов. Кроме того, имеется отклоняющее устройство для обоих управляющих устройств, причем точка отклонения управляющих устройств находится внутри пробега другого управляющего устройства.

Одно управляющее устройство работает по аналоговому способу. Этот способ заключается в том, что каждому применению перегрузочной машины в координатной плоскости соответствует определенная величина сопротивления. Осуществляется это при помощи потенциометра расположенного на перегрузочной машине, скользящий контакт которого перемещается пропорционально пройденному пути. Перемещение перегрузочной машины при этом длится до тех пор, пока не установится равновесие моста между величиной сопротивления потенциометра и сопротивлением,

находящимся вне реактора, которое соответствует нормальному положению перегрузочной машины. По аналоговому принципу положение перегрузочной машины отмечается, например, при помощи световых пятен на щите индикаторного прибора.

Другое управляющее устройство, параллельное аналоговому, работает по цифровому принципу. Этот принцип основан на отсчете импульсов. По этому принципу очень легко можно установить точно перегрузочную машину в конечное положение, поскольку повторение импульсов на единицу длины практически может быть любым.

Аналоговая система, обладая по сравнению с цифровой системой преимуществом наглядности, служит исключительно для грубого управления перегрузочной машиной во время движения.

Достоинством параллельного перемещения двух различных систем управления является то, что при нарушении одной системы другая выполняет общее управление перегрузочной машиной. При нарушении аналоговой системы это происходит автоматически, наглядный контроль осуществляется при помощи индикаторов. Визуальный контроль возможен и при цифровой системе, так как число импульсов, установленное для пути перегрузочной машины в координатной системе, фиксируется оптическим устройством.

На рис. 1 представлена схема реактора, из крышки которого выходят топливные каналы.

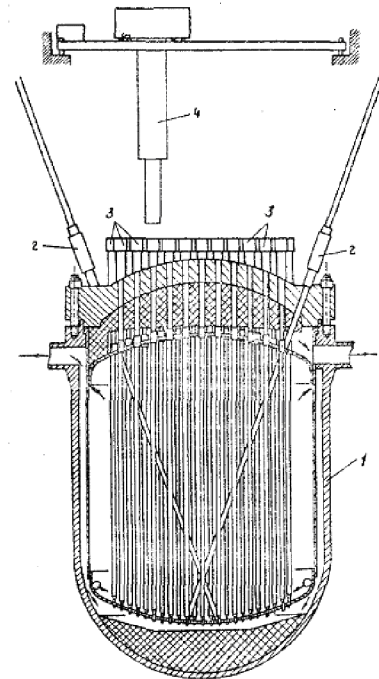


Рис. 1. Схема реактора МЗФР и перегрузочной машины: 1 – реактор; 2 – регулирующие стержни; 3 – головки технологических каналов; 4 – перегрузочная машина.

Принятая система наведения позволила выполнить скафандр подвижным относительно средства его перемещения и осуществлять стыковку путем опускания скафандра на перегружаемый канал. Для этого скафандр устанавливается на шести гидравлических домкратах, закрепленных на тележке мостового крана. Подобное решение дало возможность отказаться от телескопического стыковочного патрубка и упростило систему уплотнения перегрузочной машины и ядерного реактора.

Описание функционирования перегрузочных машин АЭС на основе сетей Петри

Область применения моделей на базе сетей Петри обширна и многогранна.

С помощью моделей СП решаются различные задачи, связанные с определением траектории движения системы в условиях неопределенности [5]. К классу таких задач относятся повышение точности наведения перегрузочных машин АЭС.

Для описания подобных объектов будет использована расширенная сеть Петри, предложенная в [5].

При изменении положения технологического канала реактора под действием тепловых и физических напряжений для сокращения пере-

грузочного цикла обычно применяют двухступенчатую систему наведения (первая ступень – грубый выход на координату, вторая ступень – точный выход).

Двухступенчатый подход к реализации системы наведения можно описать СП, в которой переходам сопоставлены квадраты плоскости движения тележки мостового крана, дугам – вероятности перехода из одного квадрата в другой в соответствии с предысторией о дрейфе технологических каналов, позициям – точки принятия решения.

Маркер отражает движения или действия оператора перегрузочной машины. Кроме того, переходам сопоставлена модель движения перегрузочной машины внутри выбранного квадрата с учетом расстояния до интересующего объекта, представленная системой дифференциальных уравнений первого порядка.

Параметры модели случайны и определяют внешнюю ситуацию.

При снижении степени детализации описания поведения перегрузочной машины сетевая модель может быть использована для обучения персонала АЭС.

Описание модели представлено в форме таблиц (табл. 1 - 3), в которых дана интерпретация элементов сети Петри на рис. 2.

Таблица 1. Описание переходов модели.

Номер перехода	Предикат, сопоставленный переходу	Функции, выполняемые при срабатывании перехода	Вектор входных позиций перехода
1	{1}	Установка исходных значений; установка вектора вероятностей для дуг, охваченных гипердугой GD_1 (1;0;0)	(1)
2	{Нажата кнопка «СТАРТ»}		(2;14)
3	{Объект с заданной точностью не обнаружен}	Чтение заданных координат и точности для цифрового устройства; установка вектора вероятностей для дуг, охваченных гипердугой GD_1 (0;0;1)	(3;13)
4	{Имеются изменения по координате X}		(4)
5	{1}	Формирование приращения координаты X для цифрового устройства	(5)
6	{1}	Формирование приращения координаты X для аналогового устройства	(5)
7	{1}	Формирование приращения координаты X	(6;7)
8	{Имеются изменения по координате Y}		(4)
9	{1}	Формирование приращения координаты Y для цифрового устройства	(9)
10	{1}	Формирование приращения координаты Y для аналогового устройства	(9)
11	{1}	Формирование приращения координаты Y	(10;11)
12	{1}	Отображение траектории движения; выдача рекомендаций	(8;12)
13	{Нажата кнопка «ДВИЖЕНИЕ»}	Установка вектора вероятностей для дуг, охваченных гипердугой GD_1 (0;1;0)	(13)
14	{Нажата кнопка «ВЫХОД»}		(13)

Таблица 2. Перечень рекомендаций при моделировании.

№	Условие выдачи рекомендации	Сообщение
1	Срабатывание перехода T_1	НАЧАЛЬНАЯ УСТАНОВКА
2	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива не превышает допустимую точность	ОБЪЕКТ ОБНАРУЖЕН. НАЖМИТЕ КНОПКУ "ВЫХОД"
2	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива превышает интервал в 4 шага координатной сетки	ОБЪЕКТ ОЧЕНЬ ДАЛЕКО
3	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива находится в интервале от 4 до 2 шагов координатной сетки	ОБЪЕКТ ДАЛЕКО
4	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива находится в интервале от 2 до 1 шагов координатной сетки	ОБЪЕКТ БЛИЗКО
5	Отклонение координат перегрузочной машины относительно координат топлива меньше 1 шага но больше допустимой точности	ОБЪЕКТ ОЧЕНЬ БЛИЗКО
6	Достигнуты установленные координаты	ЗАДАННЫЕ КООРДИНАТЫ (X, Y) ДОСТИГНУТЫ. ВВЕДИТЕ НОВЫЕ ЗНАЧЕНИЯ И НАЖМИТЕ КНОПКУ "СТАРТ"

Таблица 3. Описание событийной гипердуги.

Название гипердуги	Дуги, охватываемые гипердугой					
	Дуга D ₁		Дуга D ₂		Дуга D ₃	
	№ входной позиции	№ перехода	№ входной позиции	№ перехода	№ входной позиции	№ перехода
GD ₁	1	1	14	2	13	3

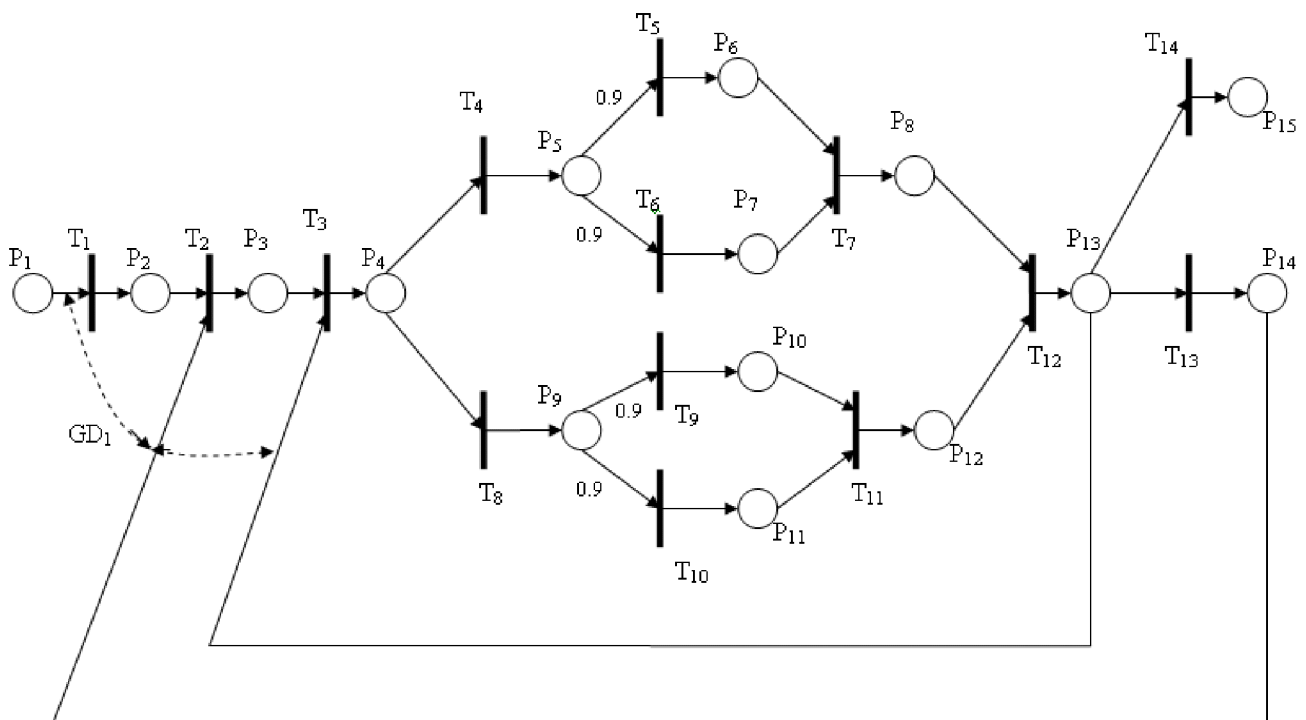


Рис. 2. Модель системы наведения перегрузочной машины

Примечание: по умолчанию вероятности, сопоставленные выходным дугам, равны 1.

Заключение

1. Анализ проблемы обеспечения безопасности перегрузки ЯТ позволил определить актуальность решения задачи управления системой наведения перегрузочной машины в случае, когда положение каналов неизвест-

но и под действием тепловых и физических напряжений каждый канал отходит от своего начального положения;

2. показано, что задача управления перегрузочной машиной является частным случаем задачи управления стохастическими системами и их соединениями. Использование

способности моделей на базе СП к самообучению при автоматическом наведении перегрузочной машины позволяет сократить сроки работ по перегрузке ЯТ и, следовательно, повысить безопасность этих работ;

3. при решении задачи дистанционного наведения необходимо, чтобы оператор быстро определял шаг и направление движения для вывода перегрузочной машины в точку с заданными координатами в активной зоне или хранилище отработавших ТВС. Развитие подобных навыков требует создания тренажеров.

Список литературы

1. Острейковский В.А. Эксплуатация атомных станций. / В.А. Острейковский – М.: Энергоатомиздат, 1999. – 928с.
2. Безсальный В.Т. Система управления перегрузочной машиной: обеспечение и оценка безопасности / В.Г. Безсальный, С.В. Виноградская, Ю.В. Розен и др. // Ядерная и радиационная безопасность. – 2005. – № 1. – С. 5-20.
3. Питерсон Д. Теория сетей Петри и моделирование систем / Д. Питерсон – М.: Мир, 1984. – 264с.
4. Дружинский И.А. Некоторые аспекты компоновки перегрузочных машин для ядерных реакторов / И.А. Дружинский, Г.Н. Новиков, Л.И. Сабир-де-Рибас – М.: ЦНИИ и ТЭИ по атомной науке и технике, 1974. – 209с.
5. Качур С.А. Принятие решения о траектории движения на основе сетей Петри / С.А. Качур // Сб. науч. тр. – Вып. 13. – Севастополь: СНИИЭиП, 2004. – С.176-180.
6. Качур С.А. Модель стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри / С.А. Качур // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №1. – С.93-98.

References

1. Ostrejkovskij V.A. *Ekspluatatsiya atomnyh stancij* [Exploitation of the atomic stations] Moscow, Energoatomizdat, 1999, 928 p.
2. Bezsalij V.T., Vinogradskaya S.V., Rozen Yu.V. Control system by a shifting machine: providing and safety evaluation. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'*, 2005, No.1, pp. 5-20.
3. Piterson D. *Teoriya setej Petri i modelirovanie sistem* [Theory of the Petry nets and systems simulation] Moscow, Mir, 1984, 264 p.
4. Druzhinskij I.A., Novikov G.N., Sabir-de-Ribas L.I. *Necotorye aspekty komponovki peregruzochnyh mashin yadernyh reaktorov* [Some aspects of arrangement of shifting machines for nuclear reac-

tors] Moscow, CNII i TEI po atomnoj nauke i tehnike, 1974, 209 p.

5. Kachur S.A. Decision-making about the motion trajectory on the basis of the Petry nets. *Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sebastopol, SNUYaE i P, 2004, No.13, pp. 176-180.
6. Kachur S.A. Model of the stochastic systems and their combination on the basis of the Petry nets. *Problemy upravleniya i infor*

УДК 621.039.58:681.518

Влияние информационных и управляющих систем на безопасность атомных электростанций

Н.И. Кузнецова¹, Н.В. Серова-Нашева², В.А. Нурзай³ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹nika100452@gmail.com, ²greydar@mail.ru, ³Mengsk777@yandex.ru

Статья поступила 28.04.2017 г.; после доработки 02.05.2017 г.

Аннотация

Выполнен анализ информационных и управляющих систем (ИУС) АЭС в аспекте безопасности АЭС. Рассмотрены относящиеся к этим системам нормативные базы России, МАГАТЭ, МЭК. Приведены влияющие на безопасность АЭС требования к ИУС и их компонентам (техническим средствам, программному обеспечению, программно-техническим комплексам), принципы оценки соответствия ИУС и их компонентов нормативным требованиям, примеры обеспечения и оценки безопасности различных систем, внедренных на АЭС РФ.

Ключевые слова: информационные и управляющие системы (ИУС), безопасность АЭС.

Influence of information and control systems on Nuclear Power Plants safety

N.I. Kuznetsova¹, N.V. Serova-Nasheva², V.A. Nurzai³Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia, . ¹nika100452@gmail.com, ²greydar@mail.ru, ³Mengsk777@yandex.ru

Received 28.04.2017 y.; received in final form 02.05.2017 y.

Abstract

The analysis of information and control systems of Nuclear Power Plants in aspect of NPP safety was carried out. Normative bases of Russia, the IAEA, and IEC related to these systems were considered. Provided requirements for information and control systems and their components (technical means, software, software and hardware complexes) affecting the safety of nuclear power plants, principles of conformity evaluation of information and control systems and their components compliance with regulatory requirements, examples of provision and assessment of the safety of various systems, implemented at Russian NPP's

Keywords: information and control systems, NPP safety.

Введение

Проблема влияния информационных и управляющих систем (ИУС) на безопасность атомных электростанций (АЭС) существует с момента создания первых АЭС.

В работе рассмотрена взаимосвязь ИУС и безопасности АЭС, так как с одной стороны ИУС влияют на безопасность АЭС, а с другой – требования к безопасности во многом определяют построение и характеристики ИУС.

Актуальность указанной взаимосвязи опре-

деляется:

- существенными изменениями требований к безопасности АЭС после аварий на АЭС Три Майл Айленд (США) и на Чернобыльской АЭС, приведшими к изменению международной и национальных нормативных баз АЭС;
- значительной долей нарушений в работе АЭС, связанных с ИУС;
- наличием в современных ИУС программных средств, влияющих на безопасность;
- появлением новых информационных тех-

нологий и достижениями в области электроники, позволяющими повысить функциональные возможности и надежность ИУС, что привело к моральному старению ранее установленных ИУС и вызвало необходимость их модернизации.

Появление новых информационных технологий привело к существенным изменениям международной нормативной базы ИУС, определяемой в первую очередь документами Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ) и Международной электротехнической комиссии (МЭК).

Примерами ИУС АЭС, влияющих на безопасность и названных, по классификации МАГАТЭ [5], системами важными для безопасности, являются: аварийная защита реактора, система управления перегрузкой топлива, система ограничения мощности реактора, блочная информационно-вычислительная система и др. Эти системы играют основную роль в управлении и наблюдении за функционированием АЭС, а также выявляют такие ситуации, когда работа энергоблока становится небезопасной и при необходимости, останавливают энергоблок.

В связи с постоянным ростом роли атомной энергетики в экономике нашей страны проблема надежности и безопасности производства все чаще требует пристального внимания. Ведь любое предприятие атомной энергетики (особенно это касается АЭС) представляет собой опасный объект, нештатная ситуация на котором может нанести непоправимый ущерб не только персоналу, но и остальному населению региона, а также окружающей среде. Вопрос обеспечения надежности и безопасности АЭС и других предприятий атомной энергетики является в наше время чрезвычайно актуальным [1,2,3].

Представленный в статье анализ не имеет аналогов ни в разработке, ни в печати.

Постановка цели научной работы

Целью данной научной работы является исследование и анализ влияния информационных и управляющих систем (ИУС) на безопасность атомных электростанций (АЭС).

ИУС являются важными для безопасности АЭС. Эти системы играют основную роль в управлении и наблюдении за функционированием АЭС, т.к. выявляют ситуации, когда работа энергоблока становится опасной и, при необходимости, останавливают энергоблок.

Первоочередными задачами, относящимися к ИУС, решение которых необходимо для обес-

печения безопасности АЭС, являются:

- модернизация действующих и создание новых ИУС, с применением современной компьютерной техники;
- продление срока эксплуатации ИУС т.к. срок службы большей части технических средств ИУС, регламентированный в документации изготовителя, составляет 8-10 лет, что значительно меньше проектного срока службы АЭС, который составляет 30 лет.

Анализ характеристик современных ИУС

ИУС – собирательное понятие, объединяющее:

- информационные системы, предназначенные для контроля состояния и/или функционирования систем;
- управляющие системы, предназначенные для формирования и выдачи управляющих воздействий, изменяющих в требуемом направлении и/или функционирование технологических систем [1,2].

Обобщенная структура и внешние связи ИУС приведены на рис. 1.

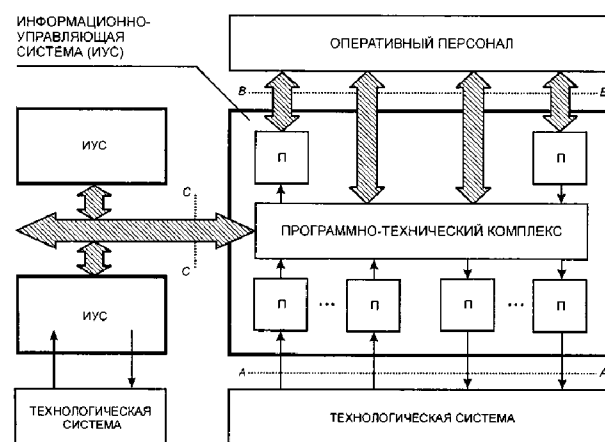


Рис. 1. Обобщенная структура и внешние связи ИУС:

П - периферийное оборудование в составе ИУС; А - интерфейс с технологической системой (объектом управления); В - интерфейс с оперативным персоналом; С - интерфейс с другими информационными и/или управляющими системами.

Границами, через которые осуществляется информационное воздействие ИУС с ее окружением, являются интерфейсы: с технологической системой (объектом управления), с оперативным персоналом; со смежными и вышестоящими информационными и/или управляющими системами АЭС.

В состав ИУС включаются все технические средства, участвующие в реализации управляющих и информационных функций, в том числе датчики и другие входные устройства, исполнительные механизмы и иные выходные устройства, а также кабели связи.

Основным направлением в развитии ИУС АЭС является широкое применение цифровой и микропроцессорной вычислительной техники.

Основными преимуществами систем с применением современной микропроцессорной техники являются:

- увеличение производительности выполнения вычислений, памяти запоминающих устройств;
- высокая надежность компьютерных компонент и высокая степень интеграции;
- возможность широкой реализации самодиагностики, а также диагностики периферийного оборудования;
- увеличение скорости передачи данных по каналам связи благодаря применению опто-электронных и фиброоптических линий;
- возможность реализации большого количества входов и выходов и т.д.

Перечисленные преимущества вызвали значительные изменения в ИУС АЭС:

- реализовано распределенное управление со структурой и функциональной децентрализацией для обмена информацией между отдельными частями системы;
- вместо релейно-контактных логических схем стали использоваться цифровые логические схемы;
- цифровыми заменяются аналоговые приборы на пульте управления, диагностическое оборудование, автоматические регуляторы, в которые можно вводить дополнительные сигналы по возмущениям и регулируемым параметрам;
- вычисления выполняются на основе микропроцессорной техники;
- появилась возможность замены отказавших элементов без остановки системы;
- периферийные устройства (например, датчики) стали выполняться как программно-аппаратные изделия, реализующие предписанные функции под управлением программы, хранящейся в памяти и т.д.

Следует помнить, что в то же время, компьютерные системы имеют ряд недостатков, существенных с точки зрения безопасности:

- внутренняя насыщенность системы повышает вероятность ошибки разработчиков;

- тестирование сложных компьютерных систем является трудоемкой задачей;
- при оценке безопасности необходимо рассматривать не только систему ИУС, как сочетание технических средств и программного обеспечения, а также используемые при этом инструментальные средства. Применение современных методов в разработке ПО позволяет обеспечить его надежность.

Компьютеризация дала возможность реализовать ряд новых функций ИУС, осуществляющих информационную поддержку деятельности персонала:

- представление параметров безопасности системами;
- поддержка принятия оператором решения, после его запроса, но при этом за оператором остается окончательное решение;
- компьютерная технология дает возможность создать интеллектуальные системы сигнализации, освобождающие операторов от перегрузки информацией и т.д.

Информационные и управляющие системы блоков ВВЭР-1000, с позиции сегодняшнего дня обладают такими недостатками, как:

- недостаточная надежность технических средств;
- неудовлетворительная диагностика технического и программного обеспечения;
- неполное удовлетворение требованиям сейсмостойчивости;
- отсутствие систем информационной поддержки персонала;
- громоздкость (большое количество шкафов);
- физическое старение некоторых компонентов и отсутствие запасных частей для многих типов технических средств, поскольку ряд организаций изменил направление деятельности или просто перестал существовать.

Все, выше перечисленное, указывает на необходимость модернизации ИУС АЭС.

Модернизация ИУС на основе руководящих документов и требований

Стратегия модернизации систем на блоках зависит от многих факторов, рассмотрим основные:

- ИУС перерабатывается до ввода блока в эксплуатацию или модернизации выполняется на действующем блоке;
- выполнение одновременной модернизации всех систем или же последовательной мо-

дернизации отдельных систем блока;

- выполнение замены всей или части ранее функционирующей системы на новую с теми же функциями или же внедрение новых типов систем, подобных которым не было на блоке.

Все перечисленные факторы взаимосвязаны друг с другом. Известно, что поэтапная модернизация может длиться годами, поэтому приоритет в модернизации тех или иных систем выбирается, как правило, по соображениям безопасности.

ИУС АЭС – это системы важные для безопасности, но само понятие и определение безопасности до сих пор является дискуссионным в терминологии РФ и международной.

В задачах надежности, рассматривают различные состояния объектов, и график переходов энергоблока между ними приведен на рис.2.

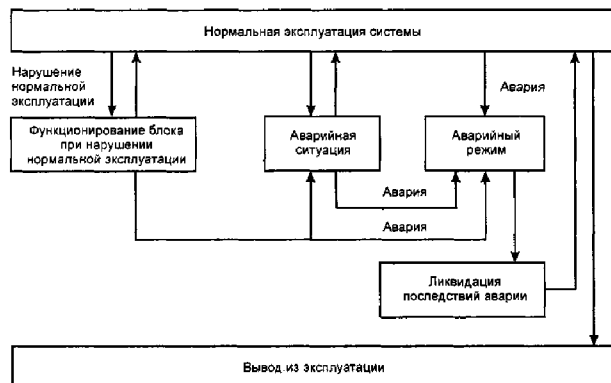


Рис. 2. График переходов энергоблока из состояния в состояние в задачах безопасности.

Показатель безопасности энергоблока или АЭС – количественная характеристика безопасности энергоблока или АЭС.

Вероятностные показатели безопасности разделяются на две группы:

- 1) показатели, определяемые вероятностными характеристиками некоторого случайного события (например, аварии, нарушения нормальной эксплуатации);
- 2) показатели, определяемые совместными вероятностными характеристиками случайного события и случайной величины ущерба из-за этого события.

Безопасность АЭС тесно связана с функциональной безопасностью ИУС, которая относится к совокупности управляемого оборудования и системы управления этим оборудованием, и определяются, как часть общей безопасности.

Показатели функциональной безопасности ИУС могут быть определены аналитически,

например, вероятностным анализом безопасности повреждений активной зоны вследствие неправильного функционирования ИУС (АСУ ТП). Другим способом определения этих показателей являются сбор и статистическая обработка данных о подобных нарушениях.

Соблюдение законодательных и нормативных документов, относящихся к ядерной и радиационной безопасности, является обязательным при осуществлении всех видов деятельности, связанных с использованием атомной энергии [1,4,5].

Для ИУС АЭС также существуют нормативные документы, представленные на рисунке 3, цели которых заключаются в следующем:

- установить требования к ИУС, необходимые для обеспечения безопасности АЭС;
- установить требования к эксплуатации ИУС;
- установить методы проверки соответствия ИУС установленным требованиям;
- служить законодательной базой в случае конфликтов и т.д.

Нормативная база России в области использования атомной энергии содержит документы, которые непосредственно либо через соподчиненные документы существенны для ИУС АЭС.

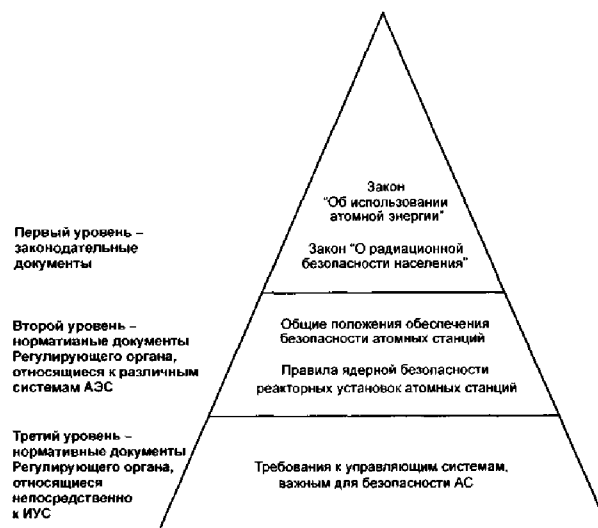


Рис. 3. Пирамида действующих в России документов по безопасности АЭС, существенных для ИУС.

В последние годы широко используются в посвященных ИУС АЭС нормативных и рекомендательных документах МАГАТЭ и МЭК такие понятия как верификация и валидация, которые связаны с различными моделями жизненного цикла ИУС.

Верификация – это деятельность, заключаю-

щаяся в доказательстве соответствия качества или характеристик некоторого элемента, системы, процесса или документа требованиям, установленным для них на предыдущей стадии жизненного цикла, а также ПО, которое спроектировано в соответствии с правилами и стандартами.

Валидация - это деятельность, заключающаяся в доказательстве соответствия качества или характеристик конечной продукции установленным требованиям на эту продукцию. Валидация может относиться ИУС, ПТК, техническим средствам и ПО.

В стандарте МАГАТЭ жизненный цикл ИУС приведен в виде так называемой V-модели, которая описывает потоки информации между этапами жизненного цикла. Приведенная на рис. 4 модель является приближенным описанием реального жизненного цикла, поскольку на практике разные этапы могут выполняться или не в такой строгой последовательности, или с итерациями, когда этапы повторяются до получения окончательного результата и т.д.

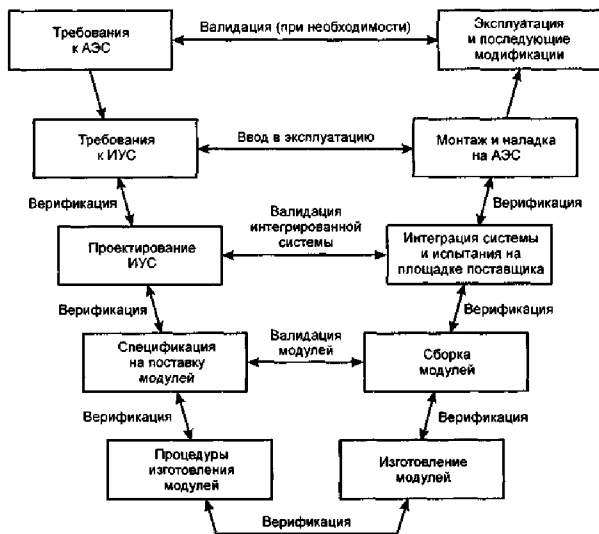


Рис. 4. V-модель жизненного цикла ИУС

Основой для выбора требований к ИУС служат:

- анализ взаимосвязи ИУС с внешней средой и, в первую очередь, с технологическим оборудованием;
- учет этапов жизненного цикла ИУС;
- соответствие требования нормативных документов, содержащих требования по безопасности АЭС в целом;
- соответствие требования национальных и межгосударственных стандартов, относящихся к ИУС;
- гармонизация с требованиями международ-

ных документов МАГАТЭ, МЭК.

Классификация ИУС по безопасности должна использоваться разработчиками систем и ПО, изготовителями, эксплуатационным персоналом АЭС и всеми иными организациями, связанными с процессом создания и эксплуатации АЭС.

Требования к ИУС в аспекте безопасности атомных станций

По влиянию на безопасность системы АЭС разделяются на (рис. 5):

- системы (элементы), важные для безопасности;
- системы (элементы), не влияющие на безопасность.

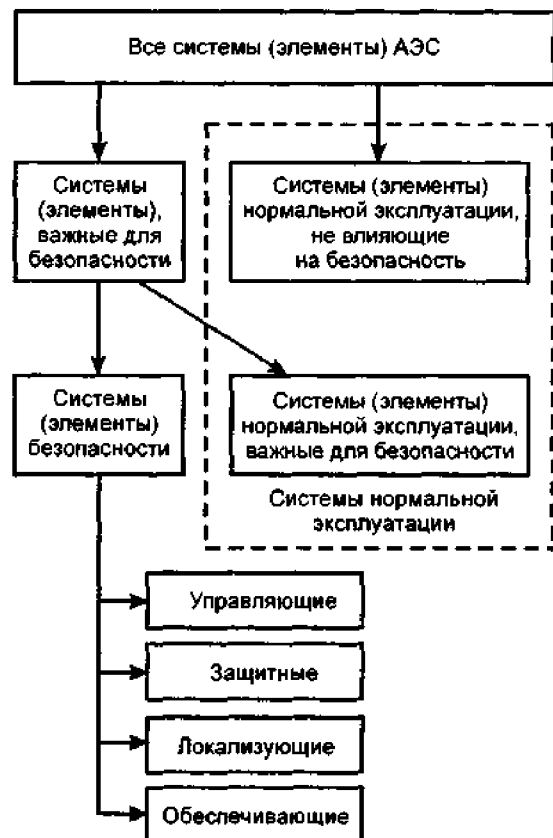


Рис. 5. Классификация систем и элементов АЭС по безопасности согласно «Общим положениям обеспечения безопасности атомных станций».

ИУС можно рассматривать, как объекты диагностирования. Задачи, решаемые в процессе диагностирования (контроль технического состояния, поиск места и определения причин отказа, прогнозирование), имеют различное значение для обеспечения безопасности.

Наиболее важным представляется контроль

технического состояния ИУС, позволяющий своевременно обнаружить возникновение дефицита безопасности (нарушение работоспособности системы управления защитными действиями или правильности функционирования системы нормальной эксплуатации, важной для безопасности) и немедленно принять меры к его устранению. Даже в тех случаях, когда при возникновении отказов работоспособность (правильность функционирования) системы сохраняется за счет резервирования, контроль технического состояния должен выявить отказавший канал, что необходимо для восстановления кратности резервирования, заданной требованиями безопасности.

Автоматический контроль технического состояния в процессе диагностирования должен охватывать следующие объекты:

- компоненты ИУС, включая ПТК и их составные части;
- независимые резервированные каналы ИУС и ПТК (при их наличии);
- цепи передачи сигналов и команд;
- каналы связи и локальные сети.

Контроль технического состояния ИУС предусматривает:

- анализ реакций объекта диагностирования на «тестовые» или «рабочие» воздействия;
- оценку диагностических признаков и/или определение значений диагностических параметров по результатам анализа;
- сопоставление диагностических признаков и/или диагностических параметров с теми, которые характеризуют работоспособность либо правильность функционирования, и идентификацию на этой основе вида технического состояния объекта диагностирования.

Автоматический контроль технического состояния ИУС должен проводиться непосредственно после ее включения (подачи электропитания) и непрерывно в процессе работы.

Одной из важнейших задач технического диагностирования, является поиск места и определение причины возникновения отказа, что имеет цель упростить и ускорить восстановление работоспособности объекта, т.е. уменьшить время существования дефицита безопасности.

Общие требования к техническому диагностированию и контролепригодности ИУС и их компонентов, важных для безопасности АЭС, устанавливают:

- перечень задач технического диагностирования;

- перечень объектов диагностирования;
- этапы контроля технического состояния и объемы проверок каждого этапа;
- требования к отображению результатов диагностирования;
- правила тестирования во время работы и в процессе периодического контроля;
- требования к составу и характеристикам сервисного оборудования и его подключению.

В настоящее время не представляется возможным регламентировать общие требования к таким показателям и характеристикам технического диагностирования как продолжительность, достоверность, полнота, глубина поиска места отказа, условная вероятность необнаруженного и ложного отказа.

Таким образом, применение предложенного анализа позволяет не только рассмотреть взаимосвязь ИУС и безопасности АЭС, но и показать, как с одной стороны ИУС влияют на безопасность АЭС, а с другой – требования к безопасности во многом определяют построение и характеристики ИУС.

Заключение

1. В ходе работы выполнен актуальный анализ информационных и управляющих систем (ИУС) АЭС в аспекте надежности и безопасности АЭС.
2. Приводятся, влияющие на безопасность АЭС, требования к ИУС и их компонентам.
3. Рассматриваются относящиеся к этим системам нормативные базы России, МАГАТЭ, МЭК, которые необходимо соблюдать на любом этапе жизненного цикла любого изделия.
4. Преимущества предложенного анализа очевидны, так как позволяют определить принципы оценки соответствия ИУС и их компонентов нормативным требованиям, а также примеры обеспечения и оценки безопасности различных систем, внедренных на АЭС РФ.
5. Еще одним из немаловажных аспектов этого анализа, в дополнение к выше перечисленным преимуществам, является его доступность, благодаря простоте и при этом достаточной глубине анализа, направленной на повышение безопасности различных систем, внедренных на АЭС.

Список литературы

1. Ястребенецкий М.А., Васильченко С.В., Виноградская С.В. и др. Безопасность атомных стан-

ций: Информационные и управляющие системы. Под ред. М.А.Ястребенецкого - К.: Техніка, 2004, 472с., ил.

2. Аникевич К.П. Системы управления и защиты реактора ВВЭР-1000: учеб. пособие /К.П. Аникевич. – Севастополь: СКУЯЭиП, 2006, 208 с.: ил.
3. ГОСТ26291-84. Надежность атомных станций и их оборудования. Общие положения и номенклатура показателей. М.: Издательство стандартов. 15с., 1987.
4. Федеральный Закон РФ «Об использовании атомной энергии» №170-ФЗ, 34с., 21.11.1995 г.
5. IAEA 50-SG-D8. Система контрольно-измерительных приборов и управления, связанные с обеспечением безопасности атомных электростанций. Вена, 1984., 99с.

References

1. Yastrebenetskiy M.A., Vasil'chenko S.V., Vinogradskaya S.V. *Bezopasnost' atomnyh stancij: Informacionnye i upravlyayushchie sistemy* [Safety of Nuclear Power Plants: information and control systems]. Edited by M.A. Yastrebenetskiy – K.: Technika Publ., 2004, 472p., ill.
2. Anikevich K.P. *Sistemy upravleniya i zashhity reaktora VVER-1000* [Control systems and protection of the VVER-1000 reactor]: Studies. grant. Sevastopol, SNUNEI Publ., 2006, 208p., ill
3. GOST26291-84. *Nadezhnost' atomnyh stancij i ih oborudovaniya. Obshchie polozheniya i nomenklatura pokazatelej*. [Reliability of atomic power stations and their equipment. General statements and reliability index nomenclature]. Moscow, Standards Publ. 15p., 1987.
4. *Federal'nyj Zakon RF №170-FZ "Ob ispol'zovanii atomnoj ehnergii"* [The federal law of RF "On the use of atomic energy" №170-FL] 34p., 21.11.1995.
5. IAEA 50-SG-D8 *Sistema kontrol'no-izmeritel'nyh priborov i upravleniya, svyazannye s obespecheniem bezopasnosti atomnyh ehlektrostancij* [Instrumentation and control systems important to safety in nuclear power plants: safety guide]. — Vienna: International Atomic Energy Agency, 2002., 99p.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СЕТИ

УДК 621.316.718

Математическое моделирование распределенного электропривода транспортных средств

Л. Н. Канов¹, А.В. Солодкий²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, lkanov48@mail.ru

Статья поступила 19.04.2017 г.; после доработки 20.04.2017 г.

Аннотация

Построено математическое описание многодвигательного электропривода колесного транспортного средства в виде системы нелинейных алгебраических и дифференциальных уравнений с учетом изменения коэффициента сцепления колес с полотном пути. Обоснована методика управления с целью стабилизации скорости, которую предложено осуществлять изменением вращающего момента двигателей.

Ключевые слова: многодвигательный электропривод, математическое моделирование, скорость платформы, стабилизация, коэффициент сцепления, вращающий момент.

Mathematical Modelling up-diffused Electricdrive of Transport Vehicles

L. N. Kanov¹, A.V. Solodkiy²

Sevastopol State University, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia
lkanov48@mail.ru

Received 19.04.2017 y.; received in final form 20.04.2017 y.

Abstract

Mathematical description of multimotive electricdrive of the wheeled transport vehicle is built as a system of nonlinear algebraic and differential equalizations taking into account the change of coefficient of rolling friction wheels with linen of way. A method is grounded management with the purpose of stabilizing of speed which it is suggested to carry out the change of rotary-type moment of engines.

Keywords: multimotive electricdrive, mathematical modelling, speed of platform, stabilizing, coefficient of rolling friction, rotary-type a moment.

Введение

В настоящее время с ростом возможностей компьютерной техники исследование и отладку новых систем управления целесообразно выполнять на математической модели, описывающей с достаточной точностью реальный объект.

Это снижает себестоимость исследований, позволяет сократить время разработки системы управления, оценить работу объекта при различных параметрах и режимах. Подобная модель, разработанная применительно к многодвигательным колесным электроприводам транспортных средств, позволяет выявить ос-

новные факторы, определяющие движение, оценить порядок уравнений модели, линейность ее отдельных частей.

Большинство существующих многоколесных транспортных средств предполагает наличие индивидуального асинхронного двигателя, приводящего во вращение колесо. Сюда относятся, например, многоосные тягачи, перемещающиеся тележки кранов [1-3], пассажирский электротранспорт, многодвигательные платформы передвижения коксовых машин [4] и др.

Отличительной особенностью подобных транспортных средств является необходимость перераспределения тяговых усилий колес в зависимости от неравномерности нагрузки, необходимость индивидуального управления электродвигателями в зависимости от величины рассогласования линейных скоростей колес и условий сцепления.

В существующей научно-технической литературе рассматриваются математические модели многодвигательных электроприводов. Так, в работе [1] определены параметры траектории движения многоколесных ходовых тележек кранов, рассмотрена кинематика свободного движения кранов. В статье [2] выполнен анализ функционирования динамической модели крана с учетом влияния боковых сил. В [3] разработана имитационная модель четырехдвигательного электропривода перемещения мостового крана с учетом взаимодействия колес с рельсами. Работа [4] посвящена описанию многодвигательного асинхронного электропривода механизма перемещения в виде нестационарной динамической матричной модели с переменной структурой в зависимости от механических параметров.

Целью настоящей статьи является дальнейшее развитие методики построения математической модели распределенного асинхронного электропривода на примере четырехколесной транспортной платформы с изменяющейся нагрузкой и условиями сцепления с дорогой.

Уравнения динамики платформы

Рассмотрим прямолинейное движение транспортного средства, рис.1. На рисунке обозначены: O – центр тяжести; L – колесная база; $N_1 = \frac{b}{L} Q_0$, $N_2 = \frac{a}{L} Q_0$ – нормальные реакции колес; Q_0 – вес платформы; M_1 , M_2 , r – вращающие моменты и радиусы колес; V_0 – линейная скорость платформы; V_1, V_2 – линей-

ные скорости колес; $V_i = \Omega_i r_i$, $i = 1, 2$; Ω – круговая скорость.

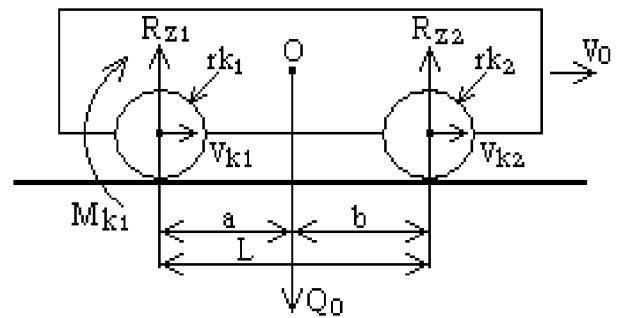


Рис. 1. Четырехколесная платформа

Сила тяги колеса F_{Ti} определяется моментом двигателя M_{ki} и затрачивается на преодоление силы трения, пропорциональной нормальной реакции $R_{zi} = k_{Ri} Q_0$ и динамического момента $\frac{J_i}{r_{ki}} \frac{dV_0}{dt}$:

$$F_{Ti} = \frac{M_{ki}}{r_{ki}} - \frac{cf_i R_{zi}}{r_{ki}} \text{sign}(V_0) - \frac{J_i}{r_{ki}^2} \frac{dV_0}{dt}, \quad (1)$$

В формуле (1) c – коэффициент шероховатости пути; f – коэффициент сопротивления качению; J_i – момент инерции колеса;

$k_{Ri} = \frac{R_{zi}}{Q_0}$ – коэффициент динамического перераспределения нагрузки. Сила трения пропорциональна нормальной реакции колеса и определяется коэффициентами c и f . Кроме того, учитывается зависимость направления силы трения от направления скорости V_0 .

В формуле (1) учтено, что линейные скорости V_0 и V_{ki} одинаковы, проскальзывание отсутствует, а момент двигателя недостаточен для пробуксовки. Коэффициент сцепления ϕ_i поверхности пути и колеса достаточно велик. Поэтому уравнение (1) описывает нормальное, рабочее движение ведущего колеса. В случае тяжелого транспортного средства, когда его общая масса m_0 гораздо больше массы колес, динамическим моментом колеса можно пренебречь, иначе следует оценивать ускорение платформы $\frac{dV_0}{dt}$ для определения силы тяги колеса.

Сила трения скольжения определяется коэффициентом скольжения ϕ_i опорной поверхности колеса с полотном пути и находится по формуле $F_{ck} = \phi k_{Ri} Q_0 = \phi R_{zi}$. Эта сила является силой тяги колеса, передающейся на платформу в режиме проскальзывания. В этом режиме скорости платформы и колеса различаются: скорость колеса определяется собственной динамикой

$$\frac{dV_{ki}}{dt} = \frac{r_{ki}}{J_i} M_{ki} - \frac{r_{ki}}{J_i} (r_{ki} \phi_i R_{zi} + cf_i) \text{sign}(V_0). \quad (2)$$

В этой формуле учитывается зависимость силы сопротивления от направления скорости. Ускорение колеса определяется разностью его вращающего момента и сил тяги и сопротивления качения. При малом значении коэффициента ϕ_i или при большом M_{ki} скорость колеса может увеличиваться. При улучшении сцепления или снижении момента скорость колеса снижается и снова становится равной скорости платформы.

Движение платформы описывается уравнением динамики [4]

$$\frac{dV_0}{dt} = \frac{1}{m_0 + \sum_{i=1}^k m_i} \left(\sum_{i=1}^n F_i - k_B V_0^2 - \text{sign}(V_0) \sum_{i=1}^k c \frac{f_i}{r_{ki}} R_{zi} \right). \quad (3)$$

В этой формуле n – количество ведущих колес; k – количество ведомых колес; k_B – коэффициент сопротивления; кроме того, учтено, что для колеса в виде обода $J_i = m_i r_{ki}^2$.

Сопротивления ведущих колес учитываются в (1) при расчете силы тяги каждого колеса. После подстановки силы тяги колеса из (1) в (3) получаем

$$\sum_{i=0}^{k+n} m_i \frac{dV_0}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{M_{ki}}{r_{ki}} - \sum_{i=1}^{k+n} \frac{cf_i R_{zi}}{r_{ki}} \text{sign}(V_0). \quad (4)$$

Полагаем, что имеется два ведущих и два ведомых колеса: $k = n = 2$.

При учете коэффициента трения скольжения возможны четыре варианта:

- (12) оба ведущие работают;
- (02) первое не работает при $M_{k1} > \phi_1 R_{z1}$;
- (10) первое работает, второе нет при $M_{k2} > \phi_2 R_{z2}$;

- оба колеса не работают при $M_{k1} > \phi_1 R_{z1}$ и $M_{k2} > \phi_2 R_{z2}$.

Силы тяги неработающих колес подсчитываются по формуле

$$F_{ck i} = \phi_i k_{Ri} Q_0 = \phi_i R_{zi};$$

из уравнения (4) исключаются слагаемые – сопротивления $\frac{cf_i R_{zi}}{r_{ki}}$ и m_i (у этих колес собственная динамика).

С учетом этого, получаем уравнения движения платформы, в которых в зависимости от соотношений между вращающимися моментами и моментами трения скольжения возможны четыре упомянутых варианта.

При одновременном выполнении следующих двух условий (достаточно большой коэффициент сцепления обоих ведущих колес)

$$|M_{ki}(t)| < (\phi_i(x) r_{ki} + cf_i) R_{zi}; \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

уравнение движения имеет вид $\frac{dV_0}{dt} = F_{12}(t, V_0)$.

Далее, при

$$|M_{k1}(t)| \geq (\phi_1(x) r_{k1} + cf_1) R_{z1} \quad \text{и} \quad (6)$$

$$|M_{k2}(t)| < (\phi_2(x) r_{k2} + cf_2) R_{z2}$$

(потеря сцепления первого ведущего колеса) имеем

$$\frac{dV_0}{dt} = F_{02}(t, x, V_0).$$

Аналогично при

$$|M_{k1}(t)| < (\phi_1(x) r_{k1} + cf_1) R_{z1} \quad \text{и}$$

$$|M_{k2}(t)| \geq (\phi_2(x) r_{k2} + cf_2) R_{z2} \quad (7)$$

(потеря сцепления второго ведущего колеса)

$$\frac{dV_0}{dt} = F_{10}(t, x, V_0).$$

При потере сцепления обоих ведущих колес

$$\frac{dV_0}{dt} = F_{00}(t, x, V_0).$$

Выражения тяговых усилий в правых частях уравнений приведены в Приложении.

Уравнения движения двух ведущих колес имеют вид при достаточно большом коэффициенте сцепления (5)

$$\frac{dV_{ki}}{dt} = K \cdot (V_0 - V_{ki}), \quad i = 1, 2; \quad (8)$$

при потере сцепления (6) или (7) получаем

$$\frac{dV_{ki}}{dt} = \frac{r_{ki}}{J_i} (M_{ki} - \phi_i(x) r_{ki} R_{zi} \text{sign}(M_{ki}) - cf_i R_{zi} \text{sign}(V_{ki})), \quad i = 1, 2.$$

В формуле (8) произведение $K \cdot (V_0 - V_{ki})$ обеспечивает быстрое приближение скорости колеса к скорости платформы при восстановлении сцепления (K – достаточно большое положительное число).

Уравнения приводных двигателей

Ведущие колеса приводятся во вращение короткозамкнутыми асинхронными двигателями.

Реализуется частотное управление двигателями.

Управляющими воздействиями является частота $\omega_{0\text{эл}}$ и модуль напряжения U_{1d} статора.

Величина напряжения пересчитывается по соотношению $U_{1d} = 1,21\omega_{0\text{эл}}$.

Поперечная составляющая напряжения статора полагается нулевой.

В соответствии с [5] уравнения двигателя в ортогональных вращающихся координатах имеют следующий вид.

Продольные составляющие тока статора и ротора

$$\begin{aligned} \frac{di_{1d}}{dt} &= \frac{1}{\Delta(i_d)} [(\psi_{0i}(i_d) + L_{2\sigma}) \cdot UD - \\ &- \psi_{0i}(i_d) \cdot \Psi D], \\ \frac{di_{2d}}{dt} &= \frac{1}{\Delta(i_d)} [(\psi_{0i}(i_d) + L_{1\sigma}) \cdot \Psi D - \\ &- \psi_{0i}(i_d) \cdot UD], \end{aligned}$$

поперечные составляющие токов

$$\begin{aligned} \frac{di_{1q}}{dt} &= \frac{1}{\Delta(i_q)} [-(\psi_{0i}(i_q) + L_{2\sigma}) \cdot \\ &\cdot (\omega_{0\text{эл}} \psi_{1d} + r_1 i_{1q}) - \psi_{0i}(i_q) \cdot \Psi Q], \\ \frac{di_{2q}}{dt} &= \frac{1}{\Delta(i_q)} [(\psi_{0i}(i_q) + L_{1\sigma}) \cdot \Psi Q + \\ &+ \psi_{0i}(i_q) (\omega_{0\text{эл}} \psi_{1d} + r_1 i_{1q})] \end{aligned}$$

Вращающий момент двигателя

$$M = 6p_n (\psi_0(i_{1d} + i_{2d}) i_{1q} - \psi_0(i_{1q} + i_{2q}) i_{1d}).$$

В этих формулах обозначены:

$$UD = U_{1d} + \omega_{0\text{эл}} \psi_{1q} - r_1 i_{1d};$$

$$\Psi D = (\omega_{0\text{эл}} - \frac{p_n}{r_k} V^*) \cdot \psi_{2q} - r_2 i_{2d};$$

$$\Psi Q = -(\omega_{0\text{эл}} - \frac{p_n}{r_k} V^*) \cdot \psi_{2d} - r_2 i_{2q};$$

продольный ток $i_d = i_{1d} + i_{2d}$;

поперечный ток $i_q = i_{1q} + i_{2q}$;

продольные и поперечные составляющие потоко-сцепления статора и ротора

$$\Psi_{1d} = \Psi_0(i_d) + L_{1\sigma} i_{1d},$$

$$\Psi_{2d} = \Psi_0(i_d) + L_{2\sigma} i_{2d};$$

$$\Psi_{1q} = \Psi_0(i_q) + L_{1\sigma} i_{1q},$$

$$\Psi_{2q} = \Psi_0(i_q) + L_{2\sigma} i_{2q}.$$

Нелинейные продольная и поперечная составляющие потоко-сцепления, учитывающие насыщение магнитной цепи, в целях исследования аппроксимируются гладкой функцией

$$\psi_0(i) = a \cdot \arctg(bi) + ci.$$

Производная от этой функции обозначена

$$\frac{d\psi_0(i)}{di} = \psi_{0i}(i).$$

Определители системы имеют вид

$$\Delta(i_d) = \psi_{0i}(i) \cdot (L_{1\sigma} + L_{2\sigma}) + L_{1\sigma} L_{2\sigma};$$

$$\Delta(i_q) = \psi_{0i}(i_q) \cdot (L_{1\sigma} + L_{2\sigma}) + L_{1\sigma} L_{2\sigma}.$$

Кроме того, в формулах обозначена:

$$\text{угловая скорость колеса } \frac{V^*}{r_k} = \Omega;$$

$$\text{частота роторной ЭДС } \omega_{0\text{эл}} - \frac{p_n V^*}{r_k} = \omega_p.$$

Символ V^* означает скорость платформы при нормальной работе ведущего колеса или линейную скорость этого колеса при проскальзывании.

Наконец, применены общепринятые обозначения:

p_n – число пар полюсов;

r_1, r_2 – сопротивления обмоток статора и ротора;

$L_{1\sigma}, L_{2\sigma}$ – индуктивности рассеяния статора и ротора.

На рис. 2 изображены расчетные графики движения платформы.

Расчет выполнен при следующих типичных параметрах двигателя мощностью 90 кВт: $r_1 = 0,0247$ Ом, $r_2 = 0,021$ Ом, $L_{1\sigma} = 0,393$ мГн,

$L_{2\sigma} = 0,64 \text{ мГн}; \quad a = 0,9588; \quad b = 0,015;$
 $c = 0,0055; \quad \Omega_{\text{ном}} = 51,4 \text{ с}^{-1}; \quad U_{1\text{ном}} = 380 \text{ В};$
 $I_{1\text{ном}} = 156 \text{ А}; \quad \omega_{p\text{ном}} = 4,67 \text{ с}^{-1}; \quad M_{\text{ном}} = 868 \text{ Нм}.$

Разгон платформы продолжался до номинальной скорости 30 м/с.

После окончания разгона в момент $t = 15 \text{ с}$ напряжение, токи и момент достигли нормальных рабочих значений.

В момент $t = 18 \text{ с}$ произошла потеря сцепления ведущих колес с полотном дороги. Нарушение сцепления имитировалось снижением коэффициента сцепления $\varphi(x)$ в 20 раз.

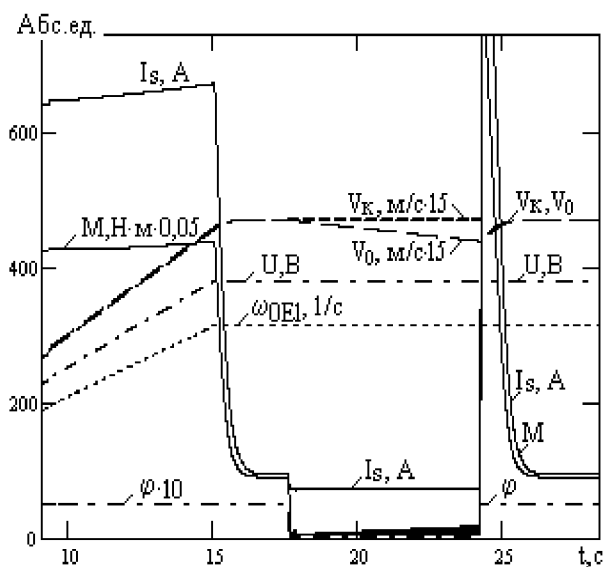


Рис. 2. Динамика движения платформы

Это состояние продолжалось 8 с. Проскальзывание сопровождалось потерей скорости платформы.

Скорости ведущих колес незначительно возрастали до синхронной вследствие снижения момента сопротивления.

После преодоления участка с пониженным коэффициентом скольжения импульсом тока и момента скорость платформы восстанавливалась.

Для предотвращения буксования напряжение следует снижать при соответствующем снижении вращающего момента.

Заключение

В статье приведены уравнения динамики колесного транспортного средства в условиях возможной неравномерной загрузки и непостоянства сцепления с дорогой, что приводит к неоптимальному режиму движения.

Признаком проскальзывания может служить уменьшение момента двигателя. Для устранения этого режима нужно снижать напряжение на двигателе, иначе после восстановления сцепления колеса с дорогой возникает ударный момент и ток при восстановлении скорости движения платформы.

Приложение

Тяговые усилия в уравнениях движения платформы:

$$F_{12}(t, V_0) = \frac{\frac{M_{k1}(t)}{r_{k1}} + \frac{M_{k2}(t)}{r_{k2}} - \dots}{m_0 + \sum_{i=1}^4 m_i} \dots$$

$$\frac{-\text{sign}(V_0) \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{cf_i}{r_{ki}} R_{zi} - k_B V_0^2}{\dots};$$

$$F_{02}(t, x, V_0) = \frac{\varphi_1(x) R_{z1} \text{sign}(M_{k1}) + \dots}{m_0 + \sum_{i=2}^4 m_i} \dots$$

$$+ \frac{\frac{M_{k2}(t)}{r_{k2}} - \text{sign}(V_0) \cdot \sum_{i=2}^4 \frac{cf_i}{r_{ki}} R_{zi} - k_B V_0^2}{\dots};$$

$$F_{10} = \frac{\frac{M_{k1}(t)}{r_{k1}} + \varphi_2(x) R_{z2} \text{sign}(M_{k2}) - \dots}{m_0 + m_1 + \sum_{i=3}^4 m_i} \dots$$

$$\frac{-\text{sign}(V_0) \cdot \left(\frac{cf_1}{r_{k1}} R_{z1} + \sum_{i=3}^4 \frac{cf_i}{r_{ki}} R_{zi} \right) - k_B V_0^2}{\dots};$$

$$F_{00} = \frac{-\text{sign}(V_0) \cdot \sum_{i=3}^4 \frac{cf_i}{r_{ki}} R_{zi} - k_B V_0^2 + \dots}{m_0 + \sum_{i=3}^4 m_i} \dots$$

$$+ \frac{\varphi_1(x) R_{z1} \text{sign}(M_{k1}) + \varphi_2(x) R_{z2} \text{sign}(M_{k2})}{\dots}.$$

Список литературы

1. Поликарпов Ю.В. Кинематика движения многоколесных ходовых тележек грузоподъемных кранов//Подъемно-транспортная техника. – 2005. – №1. – С.88–95.
2. Спицина Д.Н. Исследование боковых сил, действующих на многоколесные мостовые

- краны//Вестник машиностроения. –2003. №3. С.3–9.
3. Орловский И.А. Уточненная математическая и имитационная модели электропривода мостового крана/И.А.Орловский, Ю.С.Бут//Электротехника и электроэнергетика. – 2007. – №. 2. – С.39–51.
 4. Мазур Р.А. Улучшение регулировочных и энергетических характеристик многодвигательного асинхронного электропривода механизма передвижения коксовых машин: авторефер. дис. канд. техн. наук: 05.09.05 / Р.А.Мазур; Национальный горный университет. Днепропетровск, 2010. – 20 с.
 5. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. – М.: изд. центр «Академия», 2006. – 272 с.

References

1. Polikarpov U.V. Kinematics of motion of multi-wheel workings light carts of loadings cranes. *Podjomno-transportnaja tehnika*, 2005, No. 1, pp. 88-95. Moscow, Kolos Publ., 2008, 196 p.
2. Spitsina D.N. Research of lateral forces, operating on multiwheel travelling cranes. *Vestnik mashinostroeniya*, 2003, No.3, pp.3-9.
3. Orlovskiy I.A., But J.Ju. Specified mathematical and imitation models of electromechanic of travelling crane. *Elektrotehnika i Elektroenergetika*, 2007, No. 2, pp. 39-51.
4. Mazur R.A. Improvement of the regulation and power characteristics of a multi-motor induction electric drive of the coke machine vehicle: *avtoreferat dis. kand. techn. nauc*: 05.09.03; Natcional'nyi gornyi universitet. Dnepropetrovsk, 2010, 20 p.
5. Sokolovskiy G.G. *Elektroprivodu peremennogo toka s chastotnum regulirovaniem* [Electromechanics of alternating current with the frequency adjusting]. Moscow, Izd. tcentr "Akademiu", 2006, 272 p.

НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.039.56

**Модель движения объекта в искривленном пространстве
атмосферы естественного ядерного реактора Земли**

С.А. Качур

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

Статья поступила 05.04.2017 г.; после доработки 07.04.2017 у.

Аннотация

Предложена модель пространственно-временной деформации нижних слоев атмосферы Земли. Модель разработана в рамках представления Земли как естественного ядерного реактора, обладающего пространственно-временным монополем. Приведены необходимые значения параметров, позволяющие объекту перемещаться в искривленных пространствах атмосферы.

Ключевые слова: ядерный реактор, модель, естественный ядерный реактор, атмосфера Земли, пространственно-временной монополь.

**Movement Model of Object in the Curved Space of Atmosphere of
Natural Nuclear Reactor of Earth**

S.A. Kachur

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

Received 05.04.2017 г.; received in final form 07.04.2017 у.

Abstract

The model of spatio-temporal deformation of understrata of atmosphere of Earth is offered. A model is developed within the framework of presentation of Earth as natural nuclear reactor possessing spatio-temporal monopole. The necessary parameter value, allowing to the object to move in the distorted spaces of atmosphere, are resulted.

Keywords: nuclear reactor, model, natural nuclear reactor, atmosphere of Earth, spatio-temporal monopole.

Введение

Предлагаемая статья является продолжением исследований пространственно-временных эффектов, порождаемых ядерным реактором в состоянии близком к мгновенной критичности, а также описания пространственно-временных монополей естественного ядерного реактора Земли и естественного термоядерного реактора Солнца [1-7].

Частный результат этих исследований представлен в виде модели перемещения объекта в искривленном пространстве атмосферы Земли. Перемещение во времени и пространстве в данном случае не рассматривается как квантовая телепортация. Такое перемещение является естественным процессом перехода в различные состояния пространства, определяемые его кривизной. Причем, искривление пространства не связывается с гравитацией сверхмассивных объектов.

Предполагается, что кривизна пространства порождается ядерными и электромагнитными взаимодействиями в гравитационном поле планеты. Интерес к исследованиям пространственно-временных эффектов, реализацией переходов в иные пространства [8-12] не ослабевает.

Представляется, что наиболее близким к предлагаемой в статье идеи реализации перехода в параллельное пространство является описание «филадельфийского эксперимента», хотя средства достижения цели различны.

Эксперимент заключался в следующем. На палубе эсминца DE-173 («Элдридж») были смонтированы четыре мощных катушки с целью создания электромагнитного поля, способного скрыть корабль из поля зрения. В трюме располагались четыре синхронизированные по фазе генератора (мощностью 75 kW каждый), способные «накачивать» импульсным напряжением палубные индуктивности на резонансной частоте. 28 октября 1943 года вся эта система была включена, и эсминец исчез на некоторое время, оставив на воде четкий отпечаток своего корпуса. В результате эксперимента несколько человек исчезли навсегда, пятеро оказались вплавлены в стальную обшивку корабля, многие лишились рассудка.

Приведем один из комментариев к результатам этого эксперимента. Магнитная система образовала по периметру корабля мощное импульсное магнитное поле определенной направленности. Синхронно с магнитным образовалось вихревое электрическое поле большой напряженности, направленное перпендикулярно поверхности палубы. Мощное электрическое поле вблизи проводящей водной поверхности привело к перераспределению там электрических зарядов, к образованию на корпусе эсминца огромного электрического потенциала. Мощные импульсы электрического поля одной полярности создали огромный электрический потенциал, искажающий пространство и время в локальной области. Произошла зарядка «водного» развернутого конденсатора огромной емкости: корпус корабля приобрел электрический заряд одного знака, а противоположный заряд распределился в окружающем водном пространстве. На геометрические свойства пространства-времени оказывает влияние не только гравитационное поле, но и электрическое. Суммарный потенциал того и другого поля в любой точке замкнутого объема метagalактики равен c^2 . Любое изменение электрического или гравитационного полей приводит к изменению плотности эфира в локальной области, искривлению

пространственно-временного континуума. Пространство-время, окружающее корабль, стало не только гравитационным, но и электрическим.

Кроме рассмотренного выше примера существует множество свидетельств естественного перемещения людей в пространстве и времени, проявления феномена искривления пространства-времени при ядерных испытаниях. Проверить их достоверность не представляется возможным, но специфические детали описаний этих событий и их повторяемость в разных случаях не дают повода усомниться в их правдивости. Проблема состоит в верной интерпретации накопленного фактического и экспериментального материала.

В статье на основе анализа научных теоретических и экспериментальных исследований, учитывая описания фактических событий, предложена модель деформации пространства нижних слоев атмосферы Земли, отличная от существующих в настоящее время.

Постановка цели и задач научного исследования

Цель исследования – создание модели движения объекта в условиях пространственно-временной деформации нижних слоев атмосферы и водного бассейна Земли.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) разработать модель пространственно-временной деформации нижних слоев атмосферы и водного бассейна Земли;
- 2) определить условия перехода объекта в искривленное пространство нижних слоев атмосферы Земли;
- 3) определить особенности движения объекта в деформированном околоземном пространстве.

Модель деформированного пространства вблизи земной коры

В работе [1] определено строение монополя ядерного реактора, образованного при переходе реактора из состояния вблизи мгновенной критичности в подкритическое состояние.

Возникший монополю является специфической структурой искривленного пространства. Он включает область пространственного расширения, область задержки, область сжатия, а также небольшую область в непосредственной близости к ядерному реактору, названную областью коллапса. Последовательность этих зон

зависит от того, выступает ли реактор, как ядро монополя, в виде «скрытой» или «голой» сингулярности [3].

Пространственно-временной монополю – это устойчивое макроскопическое образование, объединяющее различной кривизны с различным течением времени пространства, обусловленные электромагнитными и гравитационными эффектами. Такое образование имеет возможность квантового изменения границ и кривизны пространств за счет вызванного внешними факторами кантования энергии ядра монополя [1].

Для ядерного реактора при коэффициенте искривления пространства монополя $k=2\pi$ [1, 2] в области коллапса искривление отсутствует, и скорость изменения времени соответствует исходному евклидову пространству.

Для монополя Земли как естественного ядерного реактора [1, 2] области коллапса соответствуют нижние слои атмосфера и водные бассейны. В отличие от искусственного ядерного реактора для естественного реактора эта область монополя деформирована.

Представляется, что эта деформация определяется магнитным полем Земли (рис. 1).

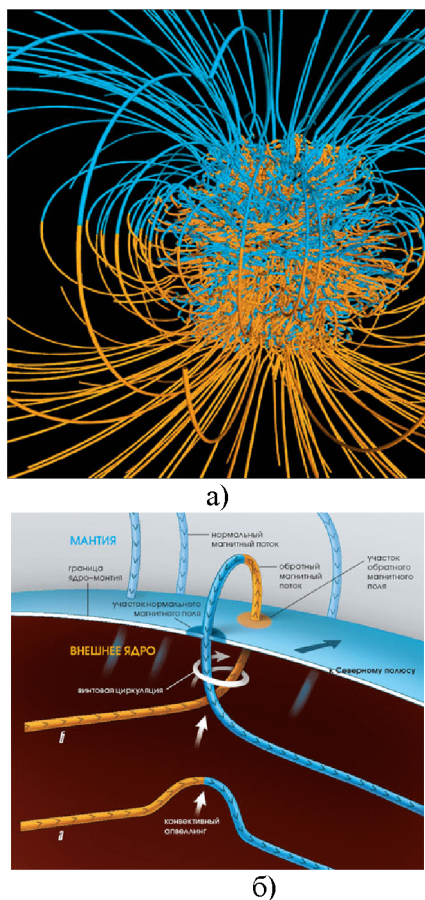


Рис. 1. Магнитные силовые линии Земли: а – компьютерная модель геодинамо; б – участок обратного магнитного поля.

Магнитные силовые линии на рис. 1а, созданные на компьютерной модели геодинамо, показывают структура магнитного поля Земли внутри ядра и за его пределами. На поверхности Земли большая часть линий магнитного поля выходит изнутри (длинные желтые трубочки) у Южного полюса и входит внутрь (длинные голубые трубочки) около Северного [13]. Возможно образование участков обратного магнитного поля (рис. 1б).

Таким образом, одновременно в околоземном пространстве могут присутствовать деформации, как сжатия, так и расширения. В узлах стоячей волны находятся точки входа/выхода в искривленное/исходное пространство. Схематически структура околоземного деформированного пространства приведена на рис. 2.

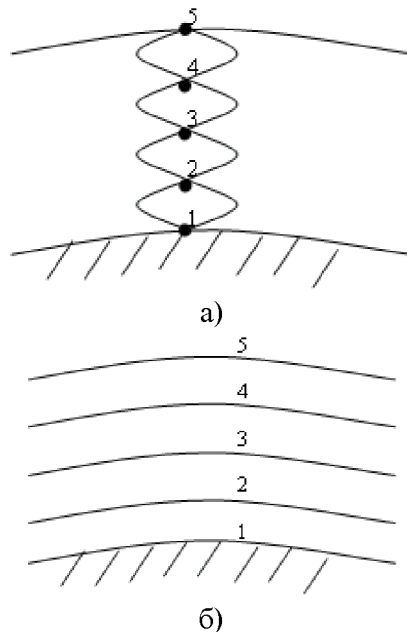


Рис. 2. Структура околоземного деформированного пространства в сечениях по меридиану (а) и параллели (б)

Параметры деформирующей волны должны быть такими, чтобы в зонах сжатия была обеспечена частота ядерного магнитного резонанса $\omega_{MP} = 3 \cdot 10^5$ Гц, а в зонах расширения частота соответствовала частотам электрических сигналов коротких аксонов головного мозга человека ($\approx 2 \cdot 10^3$ Гц). Это возможно, если коэффициент искривления рассматриваемого околоземного пространства имеет значение $k_D = 4\pi$.

Представляется, что подобная модель деформации пространства атмосферы Земли применима для описания пространственно-временных эффектов в атмосферах иных планет.

Нахождение в сжатом пространстве делает невидимым объект в исходном пространстве в любой момент времени до прохождения им узла стоячей деформирующей волны. Необходимо отметить, что для движущегося объекта в сжатом пространстве видимыми остаются из исходного пространства только объекты неживой природы (в том числе сооружения) и фауны. По-видимому, это объясняется наличием в их спектре излучения с частотой антирезонанса $\omega_{AP} = 1/137$ Гц, по величине равной постоянной тонкой структуры α .

Понятие и вывод значения частоты антирезонанса приведены в работах [1, 2]. Для расширенного пространства видимость объекта в исходном пространстве пропадает для текущего времени и сохраняется с отставанием во временных интервалах.

Условия входа и особенности движения объекта для искривленного атмосферного пространства

Естественный вход в искривленное пространство атмосферы может быть осуществлен в узлах стоячей волны, т.е. точках 1 - 5 на рис. 2. Если объект находится на суше, то вход расположен на поверхности, описываемой точкой 1. Если на поверхности воды при глубине 2π км или в воздухе над сушей на высоте 2π км, то вход соответствует точке 2. Нахождение объекта в воздухе на высоте 4π , 6π , 8π км над земной корой определяет вход в точке 3, 4, 5 соответственно.

Необходимым условием возможности появления входа в искривленное пространство является ионизация атмосферы. Известные случаи естественного перехода в параллельное пространство происходили либо при грозе, либо при затяжном дожде или сильном тумане. Причем грозовые условия приводят к входу в сжатое пространство, а в случае тумана или дождя – в расширенное пространство. Попадание человека в сжатое пространство сопровождается летальным исходом или повреждением головного мозга. Время при сжатии течет быстрее, временной интервал относительно исходного пространства увеличивается. Переход в расширенное пространство не приводит к негативному исходу. В расширенном пространстве время течет медленнее, чем в исходном пространстве.

При искусственном переходе в иное пространство нет необходимости генерировать мощные электрические разряды, достаточно осуществить ионизацию воздуха посредством

жесткого электромагнитного излучения, создаваемого ядерным реактором.

В зависимости от величины реактивности реактор генерирует различные ионизирующие излучения. При величине реактивности, стремящейся к β для ^{239}Pu , жесткое рентгеновское излучение ($\omega_p = 3 \cdot 10^{19}$ Гц) определяет возможность перемещения объекта в сжатом пространстве. При величине реактивности, стремящейся к β для ^{235}U жесткое ультрафиолетовое излучение ($\omega_{УФ} = 2 \cdot 10^{17}$ Гц) определяет возможность перемещения в расширенном пространстве.

Частота волны ионизации определяется из соотношения [14]

$$\rho' = \frac{\beta \omega_{ион}}{\lambda} \quad (1)$$

при величине реактивности $\rho' = \beta_1$ (β – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейтронов для ^{235}U ; β_1 – доля запаздывающих нейтронов по отношению к полному числу нейтронов для ^{233}U или для ^{239}Pu в зависимости от условий создания искривленного пространства; λ – постоянная распада одной эквивалентной группы мгновенных нейтронов ^{235}U).

Подобная ионизация воздуха возможна тогда, когда реактор находится в состоянии близком к мгновенной критичности. Удержание в этом состоянии реактора и перевод его затем в подкритическое состояние возможно только при создании монополя ядерного реактора.

Представляется, что вход в искривленное пространство атмосферы может произойти в центральной части монополя реактора, т.е. на границе области сжатия монополя типа «скрытая сингулярность» (500 м от центра монополя) или на границе области расширения монополя типа «голая сингулярность» (1350 м от центра монополя). Формулы расчета радиусов этих областей приведен в [1, 7].

В составе ядерного топлива ядра монополя входят ^{233}U , ^{235}U и ^{239}Pu в таком количестве, которое позволяет обеспечить возможность состояния мгновенной критичности для случая монополя типа «голая сингулярность» и монополя типа «скрытая сингулярность» [3].

Вход в сжатое пространство атмосферы обеспечивается ядерным реактором в состоянии вблизи мгновенной критичности, определенном наличием достаточного количества ^{239}Pu , при значении $\rho \rightarrow 0,0021$ и частоте реактивности $\omega = 0,48$ Гц, параметры волны ионизации обусловлены наличием ^{233}U . Вход в расширенное пространство создается ядер-

ным реактором в состоянии вблизи мгновенной критичности, определенном наличием ^{235}U , при значении $\rho \rightarrow 0,0065$ и частоте реактивности $\omega = 1,2$ Гц, параметры волны ионизации обусловлены наличием ^{239}Pu . Формулы расчета параметров реактора приведены в [1, 2].

Таким образом, одним из основных условий создания перехода в искривленное пространство атмосферы является необходимая пропорция компонент ядерного топлива ядра монополя. Данный вопрос выходит за рамки проведенных исследований. Необходимый результат может дать ядро монополя, представляющее собой конфигурацию нескольких ядерных реакторов.

В работах [1-7] предлагалось использовать для создания пространственно-временного монополя типа «скрытая сингулярность» систему двух ядерных реакторов. Схема их функционирования приведена в [1, 2, 7]. В этом случае топливо основного реактора содержит кроме ^{235}U массу близкую к критической ^{239}Pu . Ядерным топливом дополнительного реактора является ^{235}U и ^{233}U . Аналогично для создания пространственно-временного монополя типа «голая сингулярность» основной реактор имеет в качестве топлива ^{233}U и массу близкую к критической ^{235}U , а дополнительный – ^{235}U и ^{239}Pu .

Исходя из (1), величина частоты ионизации вычисляется по формуле

$$\omega_{\text{ИОН}} = \frac{\beta_1 \lambda}{\beta}. \quad (2)$$

В соответствии с (2) для входа в сжатое пространство $\omega_{\text{ИОН}} = 0,0288$ Гц (при $\beta_1 = 0,0026$), для входа в расширенное пространство $\omega_{\text{ИОН}} = 0,0233$ Гц (при $\beta_1 = 0,0021$).

Скорость ионизирующей волны составляет

$$V_{\text{ИОН}} = L \omega_{\text{ИОН}}, \quad (3)$$

где L – ширина области деформации относительно поверхности земной коры.

В соответствии с (3) при $\beta_1 = 0,0026$ $V_{\text{ИОН}} = 730$ м/с, при $\beta_1 = 0,0021$ $V_{\text{ИОН}} = 580$ м/с.

Если вход создан, то объекту для перемещения в сжатое пространство необходимо генерировать излучения на трех частотах:

- 1) приведенной частоте антирезонанса $k_D \cdot \omega_{\text{AP}} = 0,0917$ Гц;
- 2) приведенной частоте волны деформации $\omega_D \cdot k_D = \omega_{\text{MP}} = 3 \cdot 10^5$ Гц;
- 3) частоте жесткого рентгеновского излучения $\omega_P = 3 \cdot 10^{19}$ Гц.

В случае перехода в расширенное пространство объект должен обладать следующими частотами:

- 1) приведенной частотой антирезонанса $k_D \cdot \omega_{\text{AP}} = 0,0917$ Гц;
- 2) приведенной частотой волны деформации $\omega_D / k_D = 2 \cdot 10^3$ Гц; 3) частотой ультрафиолетового излучения $\omega_{\text{УФ}} = 2 \cdot 10^{17}$ Гц.

Высокочастотные излучения объекта должны иметь радиальное направление от центра Земли.

При сжатии все частоты необходимые для входа в параллельное пространство уменьшаются в k_D раз, при расширении эти частоты увеличиваются в k_D раз.

Данное обстоятельство объясняет смерть людей при сжатии из-за остановки сердца на частоте ω_{AP} и нарушения функции головного мозга, который теперь вынужден работать на частоте ядерного магнитного резонанса, которая не свойственна физической природе мозга. При расширении приведенная частота антирезонанса увеличивается до величины 1,15 Гц, что может привести при выходе человека из искривленного пространства только к небольшому сердцебиению.

При разработке систем управления движением объекта в искривленном пространстве необходимо учитывать изменение течения времени в нем относительно исходного пространства. Кроме того, сила тяжести в сжатом пространстве уменьшается в $\sqrt{2}$ раза. Обоснование этого предположения дано в [1].

Необходимо отметить специфические особенности управления движением объекта в сжатом пространстве.

Поскольку движение технического объекта не является самопроизвольным (например, как движение человека), то в параллельное пространство должна переходить вместе с объектом и установка, обеспечивающая начало его движения.

Таким образом, запуск должен производиться в искривленном пространстве, и все условия входа объекта в иное пространство должны выполняться и для пусковой установки.

Так как нахождение человека в сжатом пространстве недопустимо, то управление пусковой установкой должно осуществляться автономно на определенном промежутке времени автоматической системой.

Система управления должна быть устойчива к высокочастотному электромагнитному воздействию. В полной мере этому требованию удовлетворяют механические системы, которые в том числе позволяют достаточно просто учитывать время как параметр пространства. Дви-

жение объекта может осуществляться и на низких высотах.

Рассмотрение возможности перемещения людей в сжатом пространстве Земли представляется не целесообразным из-за сложности возможных систем защиты и высокой вероятности негативных последствий. Необходимость создания средств и систем защиты человека от воздействия фактора времени возникнет при реализации галактических полетов, расчет траектории которых будет учитывать пространственно-временные параметры монополей космических объектов.

Заключение

Предложена модель пространственно-временной деформации нижних слоев атмосферы Земли. Модель разработана в рамках представления Земли как естественного ядерного реактора, обладающего пространственно-временным монополем.

Область деформации пространства атмосферы и водных бассейнов в соответствии с этой концепцией соответствует область коллапса монополя ядерного реактора.

Определены условия входа в искривленное околоземное пространство и возможность их создания посредством использования ядерного реактора.

Получены значения параметров ядерного реактора, позволяющие генерировать излучения, открывающие вход как сжатое, так и расширенное пространство атмосферы.

Приведены необходимые значения параметров, позволяющие объекту перемещаться в искривленных пространствах атмосферы.

Предложен подход к организации системы управления движением технического объекта в сжатом пространстве.

Определены последствия перемещения в искривленных пространствах атмосферы.

Сделан вывод о необходимости создания средств и систем защиты человека от воздействия фактора времени при реализации галактических полетов.

Представляется, что подобная модель деформации пространства атмосферы Земли применима для описания пространственно-временных эффектов в атмосферах иных планет.

Для уточнения и усовершенствования предложенной модели движения объекта в искривленном атмосферном пространстве необходимо проведение ряда экспериментов.

Результаты работы определяют новые возможности применения объектов атомной энергетики.

Предложен новый подход к развитию систем безопасности и расширению космических исследований.

Выполненные исследования могут рассматриваться как теоретическая предпосылка для становления и развития квантовой теории тяготения.

Список литературы

1. Качур С.А. Управление ядерными реакторами на основе кривизны пространства./ С.А. Качур. – Севастополь: «РИБЕСТ», 2016. – 220с.
2. Качур С.А. Искривление пространства ядерного реактора вблизи мгновенной критичности посредством естественных пространственно-временных монополей/ С.А. Качур // Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2016. – Т.2. – №1. – С. 12-19.
3. Качур С.А. Модуляция сингулярности ядерного реактора вблизи мгновенной критичности.// Энергетические установки и технологии: науч. журнал. – Севастополь: ФГАОУ СевГУ, 2015. – Т.1. – №1. – С. 18-26.
4. Качур С.А. Энтропийный анализ безопасности управления ядерным реактором посредством электромагнитного излучения/ С.А. Качур // Пром. теплотехника, 2013. – Т.35, Вып. 4. – С.18-22.
5. Качур С.А. Частотный метод построения систем электромагнитного управления ядерным реактором вблизи мгновенной критичности/ С.А. Качур // Пром. теплотехника, 2013.– Т.35, Вып. 5. – С.27-32.
6. Качур С.А. Движение космического аппарата на основе модуляции кривизны пространства / С.А. Качур // Радиоэлектроника и информатика, 2013. – Вып. 2(21). – С.22-26.
7. Качур С.А. Модуляция кривизны пространства на основе системы ядерных реакторов/ С.А. Качур// Сб.науч.тр.СНУЯЭиП – Севастополь: СНУЯЭиП, 2014. – Вып. 2(50). – С.13-26.
8. Хокинг С, Пенроуз Р. Природа пространства и времени. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000. – 160 стр.
9. Блохинцев Д. Н. Пространство и время в микромире. – М.: Наука, 1982. – 176с.
10. Новиков И.Д., Фролов В.П. Физика черных дыр. – М.: Наука, 1986. – 328 с.
11. Шкловский И.С. Звезды: их рождение, жизнь и смерть. – М.: Наука, 1984. – 384с.
12. Вебер Дж. Общая теория относительности и гравитационные волны – М.: Из-во иностр. лит-ры, 1962. – 272с.

13. <http://2012god.ru/monitoring-sobytij-chast-3-teoriya-magnitnogo-polya-zemli-mexanizm-vozniknoveniya-struktura-magnitnye-buri-perepolyarizaciya>
14. Емельянов И.Я. Научно-технические основы управления ядерными реакторами. / И.Я. Емельянов, А.И. Ефанов, Л.В. Константинов, – М.: Энергоиздат, 1981. – 360с.

government bases by nuclear reactors] Moscow, Energoatomizdat, 1981, 360 p.

References

1. Kachur S.A. *Upravlenie yadernymi reaktorami na osnove krivizny prostranstva* [Control by nuclear reactors on the basis of space curvature]. Sebastopol: «RIBEST». 2016, 220p.
2. Kachur S.A. Singularities modulation of nuclear reactor near-by instantaneous criticality. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2015, Vol. 1, No 1, pp. 18-26.
3. Kachur S.A. Space curvature of nuclear reactor near-by prompt criticality by means of natural spatio-temporal monopole. *Energeticheskie ustanovki i tekhnologii*. 2016, Vol. 2, No 1, pp. 12-19.
4. Kachur S.A. Entropic analysis of safety of management by a nuclear reactor by means of electromagnetic radiation. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 4, pp. 18-22.
5. Kachur S.A. Frequency method of construction of the electromagnetic control systems by a nuclear reactor near-by instantaneous criticism. *Promyshlennaya teplotekhnika*, 2013, Vol. 35, No. 5, pp. 27-32.
6. Kachur S.A. Movement of space vehicle on the basis of modulation of space curvature. *Radioelektronika i informatika*, 2013, No. 2(21), pp. 22-26.
7. Kachur S.A. Modulation of space curvature on the basis of the nuclear reactors system. *Sb. nauch. tr. SNUYaE i P*, Sebastopol, SNUYaE i P, 2014, No. 2(50), pp. 13-26.
8. Hawking S., Penrose R. *Prirpda prostranstva i vremeni* [The Nature of Space and Time]. Isevs, NICH «Regulyarnaya I khaoticheskaya dinamika», 2000, 160 p.
9. Blokhinshev D.N. *Prostranstvo i vremya v mikromire* [Space and time in microcosm.] Moscow, Nauka, 1982, 176 p.
10. Novikov I.D., Frolov V.P. *Fizika chyornyh dyr* [Physics of black holes]. Moscow, Nauka, 1986, 328 p.
11. Shklovskij I.S. *Zvyozdy: ih rozhdenie, zhizn' I smert'* [Stars: their birth, life and death]. Moscow, Nauka. 1984, 384p.
12. Weber J. *Obschaya teoriya otnositel'nosti i gravitacionnye volny* [General relativity and gravitational waves]. Moscow, Iz-vo inostr. lit-ry. 1962, 272 p.
13. <http://2012god.ru/monitoring-sobytij-chast-3-teoriya-magnitnogo-polya-zemli-mexanizm-vozniknoveniya-struktura-magnitnye-buri-perepolyarizaciya>
14. Emelyanov I.Y., Efanov A.I., Konstantinov L.V. *Nauchno-tehnicheskie osnovy upravleniya yadernymi reaktorami* [Scientific and technical

УДК 621.92

Изменение мощностных характеристик фотоэлектрических установок при различных климатических факторах

В.В. Кувшинов

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская, 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹kuvshinov.vladimir@gmail.com

Статья поступила 10.05.2017 г.; после доработки 12.05.2017 г.

Аннотация

Описываются исследования фотоэлектрических модулей, проведенные в городе Севастополе, с целью изучения режимов их работы при различных атмосферных условиях. Изменение климатических факторов сильно влияет на их мощностные характеристики и на выработку солнечных установок. Точные данные о режимах работы фотоэлектрических систем позволяют более правильно рассчитывать их характеристики и проводить проектные работы.

Ключевые слова: фотоэлектрическая установка, кремниевые солнечные элементы, плоский солнечный концентратор, фотоэлектрический модуль, солнечная электростанция.

Variation in the power characteristics of photovoltaic plants under different climatic factors

V.V. Kuvshinov

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

Received 10.05.2017 y.; received in final form 12.05.2017 y.

Abstract

Studies of photoelectric modules conducted in the city of Sevastopol are described with the aim of studying the modes of their operation under various atmospheric conditions. The change in climatic factors strongly influences both their power characteristics and the development of solar installations. Accurate data on the operating modes of photovoltaic systems allow more accurate calculation of their characteristics and carry out design work.

Keywords: photovoltaic installation, silicon solar cells, flat solar concentrator, photoelectric module, solar power station.

Введение

С современным развитием науки и техники с каждым годом все большее внедрение в энергетику получают фотоэлектрические солнечные установки, они преобразуют падающую на них солнечную радиацию и являются генераторами постоянного электрического тока [1].

Эти установки используются для сетевых солнечных электростанций и автономных фотоэлектрических систем.

Их работа сильно зависит от прихода солнечной радиации и спектра излучения. Их параметры меняются в зависимости от различных климатических факторов: пасмурности, прозрачности атмосферы, отраженного солнечного излучения от поверхности земли и снегового покрова.

Определение электрических характеристик солнечных установок в различных наземных климатических условиях является важным фактором для расчетов энергетических характеристик фотоэлектрических систем [2].

Постановка задачи исследования

Главной проблемой применения солнечных установок является невысокая плотность потока солнечной радиации, преобразовываемой в электрическую энергию, их низкий КПД и невысокая эффективность использования, и как следствие высокая себестоимость за единицу мощности.

Невысокий термический потенциал солнечной энергетики определяет более высокие требования к эффективности использования солнечных установок для электроснабжения, к методам определения основных параметров эффективности фотоэлектрических модулей.

КПД современных промышленных монокремниевых и поликремневых солнечных элементов составляет 17-20%.

Однако при изменении спектра солнечного излучения в пасмурную или облачную погоду КПД заметно падает, что приводит к снижению мощностных характеристик фотоэлементов.

Исследование сезонной работы фотоэлектрических модулей

Эксперименты проводились в натуральных условиях (в Севастопольском государственном университете) на открытой территории в ясные солнечные дни при постоянной мощности падающего солнечного излучения (освещенности). При проведении исследований использовался метод прямых измерений по току и напряжению фотопреобразователей, при переменном нагрузочном сопротивлении [3]. Главной целью данного исследования было получение зависимостей изменения выходной мощности фотоэлектрической батареи в разные месяцы года.

Для исследований использовались монокремниевые модули малой номинальной мощности: ISM-50 (50 Вт) и ARX-12 (12 Вт), КПД элементов этих модулей составляет 14-15%. На графиках (рис. 1) и в табл. 1 приведены усредненные вольт-амперные и мощностные характеристики, полученные при испытаниях за 2016-2017 г.

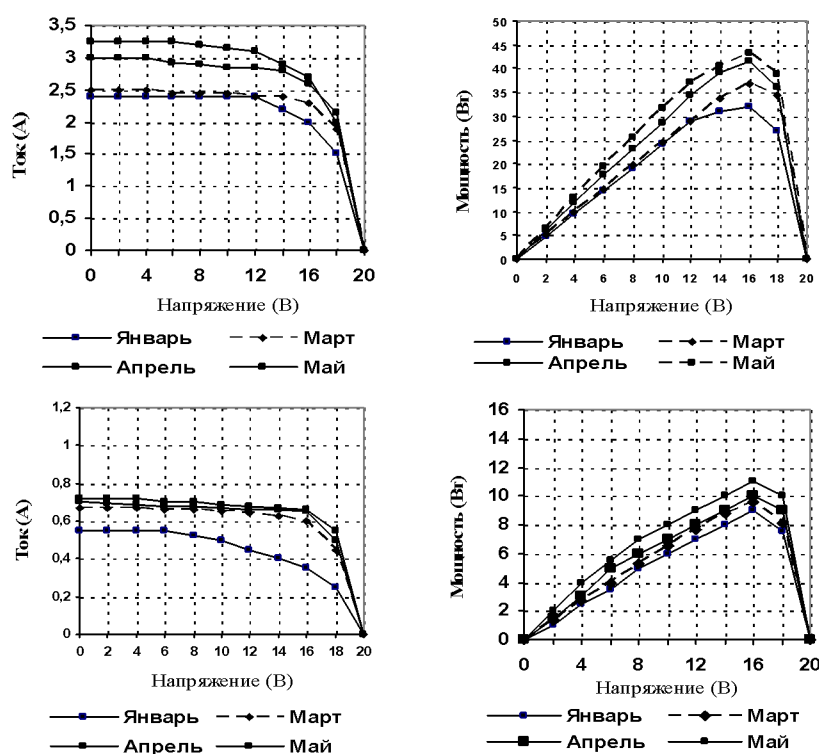


Рис. 1. Вольтамперная и мощностная усредненные характеристики модулей ISM-50 (верхние графики) и ARX-12 (нижние графики) для разных месяцев года (данные получены при температурах около 15°C, и различных освещенностях)

Значения заводских измерений максимальной мощности модуля ISM-50 соответствуют значениям 17 В и 3 А. Однако при натурных испытаниях значение напряжения в рабочей точке с увеличением освещенности в весенние

месяцы падает до 14-16 В (в основном за счет большего нагрева модуля) (рис 1), при этом мощностные характеристики сохраняются, а значения тока растут сильнее, чем по результатам заводских испытаний [2.3]. Коэффициент

преобразования солнечных элементов модуля ISM-50 (табл. 1), различается в разные месяцы. Так в январе он наибольший, а в мае наименьший.

Таблица 1. Характеристики модуля ISM-50.

Месяцы	Освещенность (Вт/м ²)	Атмосферная температура (°C)	Максимальная мощность	КПД фотоэлементов
Январь	640	10	32 Вт	14,2 %
Март	740	12	36,8 Вт	14 %
Апрель	850	13	41,6 Вт	13,8 %
Май	900	15	43,2 Вт	13,6 %

Исследование выходных характеристик фотоэлектрического модуля ISM-50 при различных климатических факторах

Экспериментальные значения вольт-амперных характеристик модуля были получены при различных температурных показателях.

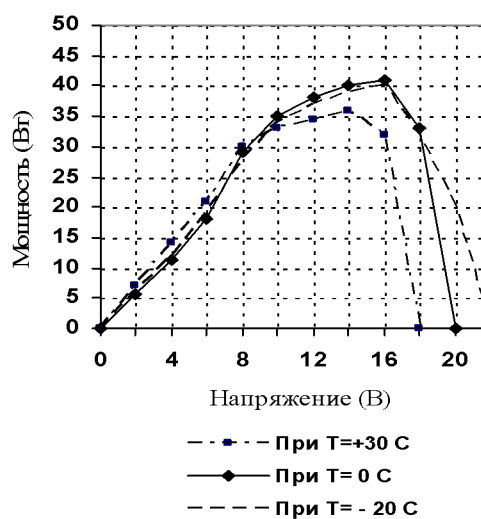
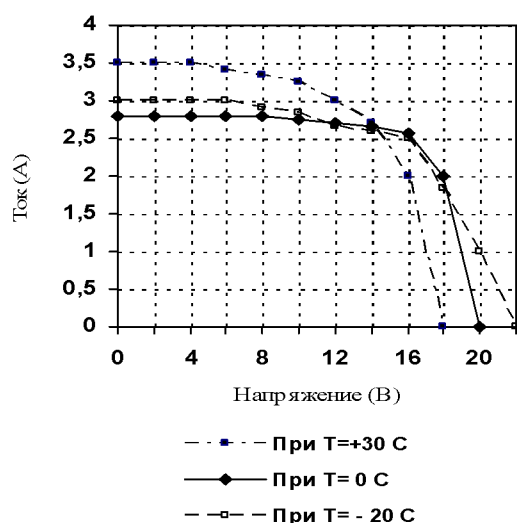


Рис. 2. Зависимости вольт-амперной и мощностной характеристик модуля ISM-50 полученные в разное время года при одинаковой освещенности (около 820 Вт/м²) и различной атмосферной температуре.

При отклонении плоскости модуля от перпендикулярного направления на точку, в которой находится Солнце, фототок и вырабатываемая мощность начинают расти, и достигают своего максимума при горизонтальном расположении модуля (рис.3).

Это происходит в момент, когда солнечный диск полностью закрыт облаками и модуль преобразовывает только рассеянное излучение, приходящее со всех сторон небосвода [1].

На графиках рис.2 видно, что при одинаковых значениях освещенности, мощность модуля была большей при низких температурах, также менялась форма вольт-амперной характеристики. Коэффициент преобразования модуля, в зависимости от освещенности, улучшается в холодную ясную погоду, особенно эффективно работал модуль в январе при $T = -20^{\circ}\text{C}$, и снижается в летние месяцы при повышении температуры рабочей поверхности.

Как видно из результатов, наилучший режим работы модуля наблюдался при отрицательных температурах (например -20°C , январь 2016). Холодная температура воздуха положительно сказывается на работе модуля, причем хорошо видно увеличение коэффициента преобразования модуля.

В условиях облачности (освещенность менее 200 Вт/м²), зависимость мощностных характеристик модуля от угла наклона меняется по другим характеристикам (график на рис. 3).

При высокой облачности угол установки модуля к горизонту, для максимальной мощности, должен составлять 0° , при ясной погоде, наоборот, угол установки плоскости модуля соответствовал направлению на Солнце, т.е. равнялся углу солнечного склонения. При этом, при равной освещенности КПД фотоэлементов модуля был выше в ясную погоду, чем при высокой облачности (табл.2), т.е. на работу модуля влияет

спектр солнечного излучения, который различен в пасмурную и ясную погоду [1,4].

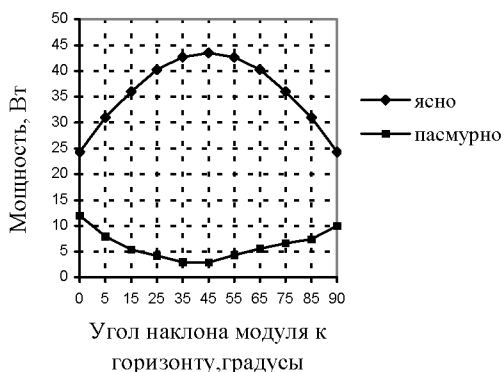


Рис. 3. Изменение мощности модуля ISM50, в зависимости от угла наклона при различной облачности.

Также необходимо отметить резкое повышение мощности (более 10%) при небольшой пасмурности, при выходе Солнца из-за облака.

Повышение мощности наблюдалось около 1 - 2 минут, затем мощность снижалась до значения соответствующего постоянной освещенности для ясной погоды.

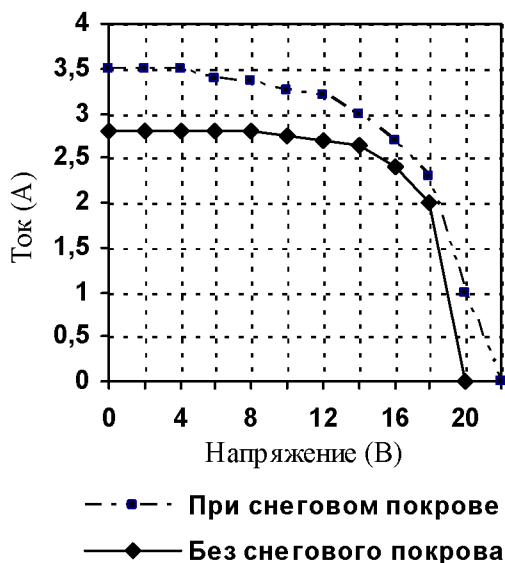


Таблица 2. Характеристики модуля ISM-50 в ясную и пасмурную погоду.

Облачность	Угол установки модуля	Освещенность рабочей поверхности (Вт/м^2)	КПД фотоэлементов модуля
Ясно	45 °	880	14 %
Пасмурно	0 °	280	12 %
Переменная облачность	45 °	От 550 до 880	Около 13 %

Повышение мощности связано с увеличением потока излучения, который при небольшой облачности в некоторых точках земной поверхности может быть выше, за счет суммирования прямого и отраженного от облаков потока солнечной радиации [1].

Представляет интерес зависимость работы модуля при наличии снегового покрова (рис.4).

Значительное увеличение мощности происходило при отражении света от снежного покрова, т.е. при увеличении альбедо.

При этом суммарная мощность потока солнечной радиации, с учетом альбедо, составляла более 900 Вт/м^2 , что в этом месяце даже в ясную погоду не наблюдается. Однако за счет отражения света от поверхности снежного покрова прибавка в освещенности составляла до 30%.

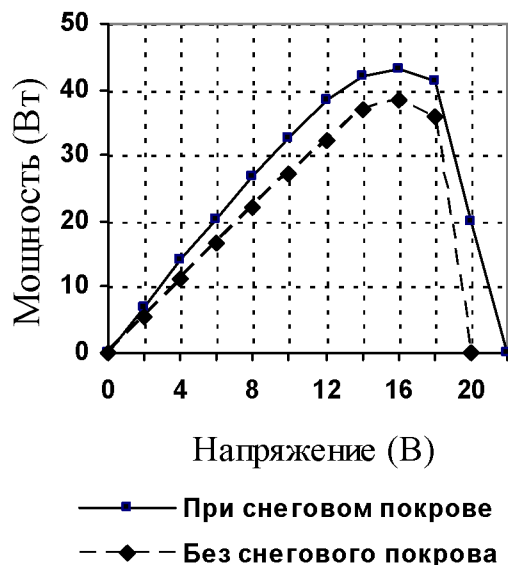


Рис. 4. Вольт-амперные и мощностные характеристики полученные при наличии снежного покрова (мощность падающего солнечного излучения 770 Вт/м^2).

При этом модуль вырабатывал меньшую мощность, чем при такой же освещенности без снежного покрова, т.е. КПД фотоэлементов уменьшалось. Это можно объяснить отличной спектральной составляющей отраженного от снежного покрова света, которая хуже преобразовывается модулем [1,4]. На графиках (рис. 4) заметно увеличение мощности модуля за счет

отраженного потока от снеговой поверхности, однако коэффициент преобразования падает (табл. 3).

Полученные данные, необходимы при расчетах годовой выработки электроэнергии солнечными электростанциями [3]. Как видно из данных, конечные значения выработки электроэнергии, при учете указанных в данной работе

факторах, могут различаться более чем на 30%, как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения.

Таблица 3 Характеристики модуля ISM-50 при наличии снегового покрова.

Снеговой покров	Наличие покрова	Отсутствие снега
Мощность падающего излучения, Вт/м ²	770	770
Суммарная освещенность (с учетом альбедо), Вт/м ²	925	770
Атмосферная температура, °С	- 5	- 5
Номинальная мощность модуля ISM-50	43,2 Вт	38,4 Вт
КПД фотоэлементов	13,2 %	14,1 %

Повышение мощности серийных фотоэлектрических модулей за счет использования плоских концентраторов

Исследования сезонной работы модулей типа ISM-50 и ARX-12 с плоскими концентраторами проводились на открытой площадке (рис.5).

В качестве концентраторов светового потока были взяты зеркала, используемые, в свое время, на Крымской солнечной станции СЭС-5

и плоские отражающие поверхности со светоотражающей фольгой марки ORAFOL [5].



Рис. 5. Плоские концентраторы для модуля ISM – 50 (Севастопольский госуниверситет).

При проведении исследований из графиков, приведенных на рис. 6 видно, что применении, в качестве концентраторов светового потока боковых отражающих поверхностей одинаковых размеров [5] мощность, вырабатываемая модулями, увеличивалась более чем на 30% для модуля ISM-50 и на 50% для модуля ARX-12. Большая мощность на втором модуле объясняется большим геометрическим коэффициентом концентрации.

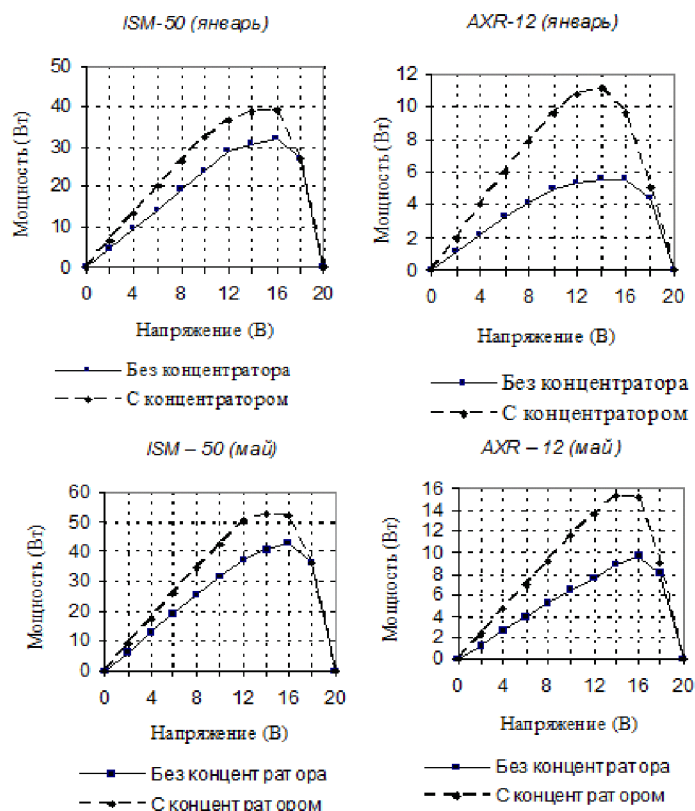


Рис. 6. Характеристики модулей ISM-50 и ARX-12 с плоским концентратором (данные получены в январе, мае).

В таблице 4 приведены результаты исследований для января и мая. Солнечная освещенность на перпендикулярную площадку составляет до 800 Вт/м².

Таблица 4. Значение входных характеристик для модуля ISM-50 при использовании отражающих граней (освещенность 800 Вт/м²).

Концентратор	Количество отражающих граней		
	Без граней	Одна	Две
Геометрический коэффициент концентрации	1	1,5	2
Максимальная мощность модуля	40 Вт	52 Вт	56 Вт
Увеличение выходной мощности	0%	30%	40%

При использовании одной боковой отражающей грани (табл. 4) видно, что увеличение мощности доходило до 30 % (геометрический коэффициент концентрации 1,5). При использовании двух граней, несмотря на увеличение геометрического коэффициента концентрации до 2, мощность модуля увеличивалась до 40% (т.е. реальный коэффициент преобразования уменьшался). Одна отражающая грань более проста в использовании, при её расположении внизу модуля не требуется ориентации на направление светового потока.

Выводы

1. Для использования в реальных условиях фотоэлектрических установок необходимо знать изменение их характеристик при различных климатических условиях. На основе натурных исследований, были получены данные о режимах работы серийных фотоэлектрических модулей ISM-50 и ARX-12, показано изменение КПД модулей, полученное при исследованиях их работы при различных атмосферных температурах (от -20°C и до +40°C), при различной облачности и наличии снегового покрова.
2. Для увеличения мощностных характеристик модулей, могут использоваться плоские солнечные концентраторы [5]. Однако их применение не всегда является эффективным. В данной работе показано, что при использовании одной отражающей панели мощность модуля возрастала на треть, когда при использовании двух на 40%. использование одной панели может быть более эффективно.
3. Описанные результаты исследований могут быть полезны для описания работы не толь-

ко автономных фотоэлектрических установок, но и крупных солнечных электростанций. Наличие данных об использовании в натуральных условиях составляющих модулей позволяет более точно рассчитывать выработку и проектировать фотоэлектрические системы.

Список литературы

1. Колтун М.М. Оптика и метрология солнечных элементов / М.М. Колтун // – М.: Наука, 1985. – 300 с.
2. Фотоэлектрические приборы из кристаллического кремния. Методика коррекции результатов измерения вольтамперной характеристики (МЭК 891-87): ГОСТ 28976-91. – [Введ. 19.04.91]. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 42 с. – (Национальный стандарт России).
3. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей / Г. Раушенбах // – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 397 с.
4. Беляев Ю. М. Повышение эффективности использования наземных фотоэлектрических систем / Ю. М. Беляев, А. С. Нагайкин, Ю. В. Разгоняев // Гелиотехника. – Ташкент: ФАН, 1989. – №2. – С. 6 – 10
5. Кувшинов В.В. Пат. 150120 Российская федерация; МПКН01L31/00. Солнечный концентратор/Кувшинов В. В., Башта А.И., Сафонов В.А.; патентообладатель Кувшинов В. В. – Заявка № 2014149411; заявл. 17.10.2014; опубл. 27.01.2015, Бюл. № 3.

References

1. Koltun M.M. Optics and metrology of solar cells / M.M. Koltun // - Moscow: Nauka, 1985. - 300 p.
2. Photovoltaic devices from crystalline silicon. Method of correction of the results of measuring the current-voltage characteristic (IEC 891-87): GOST 28976-91. - [Enter. 19.04.91]. - Moscow: IPK Publishing House of Standards, 2004. - 42 pp. - (National Standard of Russia).
3. Rauschenbach G. Handbook on the design of solar batteries / G. Rauschenbach // - M.: Energoatomizdat, 1983. – 397.
4. Belyaev Yu. M. Increase of the efficiency of the use of terrestrial photoelectric systems / Yu. M. Belyaev, AS Nagaikin, Yu. V. Razgonyaev // Heliotechnics. - Tashkent: FAN, 1989. - № 2. - P. 6 – 10.
5. VV Kuvshinov. Pat. 150120 Russian Federation; IPC N 01 L 31/00. Solar concentrator / Kuvshinov VV, Bashta AI, Safonov VA.; Patent holder- Kuvshinov VV - Application No. 2014149411; Claimed. 10/17/2014; Publ. 01/27/2015, Byul. No. 3.

УДК 620.9:33

Возможности улучшения эффективности утилизации отработанных солнечных панелей

В.О. Мазитов¹, А.В. Горпинченко²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», ул. Университетская 33,
г. Севастополь, 299053, Россия, ¹vlad.mazitov.2013@gmail.com, ²algornew@mail.ru

Статья поступила 16.05.2017 г.; после доработки 18.05.2017 г.

Аннотация

Рассматриваются актуальные вопросы экологии в электроэнергетике. Освещена текущая ситуация с солнечной энергетикой в мире, в частности, быстрый рост производства и реализации фотоэлектрических панелей, что в ближайшей перспективе приведет к началу массовой утилизации отработанных панелей, и их влияние на экологию.

Предложен вариант улучшения утилизации отработанных фотоэлектрических панелей, основанный на конструктивной модернизации самих панелей.

Ключевые слова: Фотоэлектрические преобразователи, солнечная энергетика, утилизация, экология.

Opportunities to improve the efficiency of disposal of used solar panels

V.O. Mazitov¹, A.V. Gorpichenko²

Sevastopol, State University, 33 Universitetskaya str., Sevastopol, 299053, Russia.
¹vlad.mazitov.2013@gmail.com, ²algornew@mail.ru

Received 16.05.2017 y.; received in final form 18.05.2017 y.

Abstract

Examines current environmental issues in the power sector. Lit the current situation with solar energy in the world, in particular, rapid growth in production and sales of photovoltaic panels, which in the short term will lead to the beginning of the mass disposal of used panels and their impact on the environment.

Offered the option of improving the disposal of spent photovoltaic panels based on structural modernization of the panel.

Keywords: Photoelectric converters, solar energy, utilization, ecology.

Введение

В условиях снижения запасов энергоресурсов и ухудшения экологической обстановки в мире, политика промышленно развитых стран в области энергетики сильно изменилась. На смену традиционным источникам энергии приходят альтернативные возобновляемые, к которым относится в том числе и солнечная энергия.

13 апреля 2000 года была создана European Renewable Energy Council (EREC) - зонтичная организация европейских компаний, работаю-

щих в области производства, продажи и исследований устройств возобновляемой энергетики: солнечной-, гидро-, био-, геотермальной и ветроэнергетики.

Самое крупное в мире отраслевое объединение компаний на рынке солнечной энергетики EPIA (European Photovoltaic Industry Association), также входит в организацию.

За последнее десятилетие солнечная энергетика сделала большой рывок. Суммарная мощность установленных и функционирующих на планете фотоэлектрических преобразовате-

лей (ФЭП) к концу 2013 составила - 38 ГВт. При этом 70% мирового рынка ФЭП составляет европейский.

Первую позицию в европейском рейтинге занимает Германия, чему немало способствовала государственная политика. В частности, так называемый «Feed-in Tariff» - возможность продажи излишков произведенной панелями энергии по более высоким ценам, для их окупаемости.

Последовав примеру Германии, Италия по результатам 2009 года заняла второе место в Европе и мире по продвижению ФЭП на энергетический рынок. Испания в связи с бюрократическим кризисом занимает третье место, но ЕРІА прогнозирует рост рынка ФЭП в будущем.

В Великобритании солнечная энергетика развивается довольно плавно, без резких скачков и падений.

Что касается остальных стран, то более или менее стабильно ведут себя Бельгия, Болгария, Чехия, Франция. На юге Европейского союза - Греция и Португалия, как наиболее благоприятном с географической точки зрения месте - затишье [1].

Россия в начале двухтысячных годов сильно отставала от Европы в развитие возобновляемой энергетики, и только 9 лет назад начала активно заниматься вопросами производства, реализации и использования возобновляемых источников энергии, чему способствовал указ президента РФ от 4 июня 2008 г. N 889, о бюджетных ассигнованиях, необходимых для поддержки и стимулирования реализации проектов использования возобновляемых источников энергии и экологически чистых производственных технологий [2].

Солнечная энергия может стать одним из главных источников электроэнергии благодаря экологическим и экономическим преимуществам, а также доказанной надежности.

Ежегодно солнечные панели претерпевают изменения, разрабатываются новые типы панелей и улучшаются старые.

На данный момент промышленные солнечные панели могут преобразовывать до 20% солнечной радиации, лабораторные же установки показывают результат в 40%.

Более подробно типы фотоэлектрических преобразователей и их КПД предоставлены в таблице 1.

В будущем солнечные панели могут покрыть огромный процент потребности населения в электроэнергии [3].

Рациональное использование природных ресурсов и безопасной утилизации отходов ци-

вилизованного общества, а также повышение эффективного его контроля является насущной экологической проблемой.

Таблица 1. Типы фотоэлектрических преобразователей и их КПД.

Тип	Состав	КПД %
Кремниевые	Поликристаллические	15
	Монокристаллические	20
Тонкопленочные, на основе:	Аморфного кремния	10
	Теллурида кадмия	10-11
	Селенида меди-индия-галлия	12-13
	Органические	10
Многослойные (многослойные)	Двухслойная ячейка	42
	Трехслойная ячейка	49
	Многоячейные	68

В настоящее время больше внимания уделяется использованию солнечной энергии для получения электроэнергии. Получение энергии за счет солнечных батарей используют для обеспечения коммунально-бытовых и технологических нужд различных потребителей [4].

По мнению специалистов правильно рассчитанная солнечная система может покрыть до 50% энергетических затрат расходуемых обычно на электроэнергию — как в домашних хозяйствах, так и в производстве [5].

Подсчитано, что если в пустыне Сахара разместить солнечные батареи на территории 160 квадратных километров, то можно полностью отказаться от всех других источников и видов энергии нефти, газа, урана, воды, ветра и т.д. [4]. Ученые полагают, что сгенерированная на основе солнечного излучения энергия сможет к 2050 году обеспечить 20–25% потребностей человечества в электричестве и сократит выбросы углекислоты. Как полагают эксперты Международного энергетического агентства (IEA), солнечная энергетика уже через 40 лет при соответствующем уровне распространения передовых технологий будет вырабатывать около 9 тысяч тераватт-часов — или 20–25% всего необходимого электричества, и это обеспечит сокращение выбросов углекислого газа на 6 млрд. тонн ежегодно [6].

Постановка задачи исследования

В связи с улучшением эффективности ФЭП, их производство ежегодно повышается.

Из-за этого возникает серьезная проблема утилизации этих панелей в будущем, т.к. возможное формирование свалок с отработавшими

ФЭП может вызвать экологические проблемы [7]. Рост производства фотоэлектрических модулей представлен на графике рисунка 1.

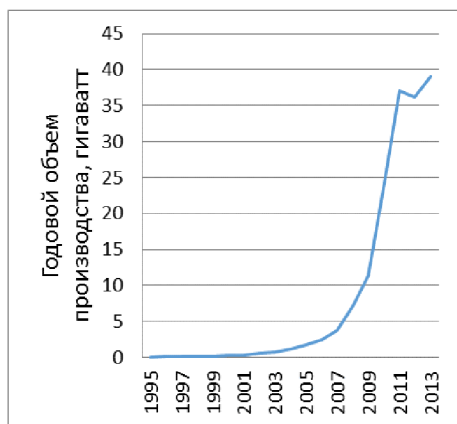


Рис. 1. Рост производства фотоэлектрических модулей.

Не смотря на то, что сами панели и производят чистую и безопасную энергию, но при производстве этих панелей используется множество вредных веществ, таких как галлий, кадмий, мышьяк, свинец и др. Создание свалок отработанных ФЭП приведет к попаданию этих веществ в окружающую среду. Необходимо дополнительное расширение индустрии по утилизации ФЭП. Учитывая, что средний срок службы панели равняется 20-30 годам, в зависимости от условий эксплуатации, можно предположить, что в будущем может возникнуть острая потребность в утилизации огромного количества этих панелей, так как большая часть эксплуатируемых ныне панелей еще не достигла конца срока своей эксплуатации. Эксперты полагают, что количество отходов существенно увеличится после 2020 года [4]. Прогнозируемое увеличение отходов от солнечной энергетики представлено на рис. 2.

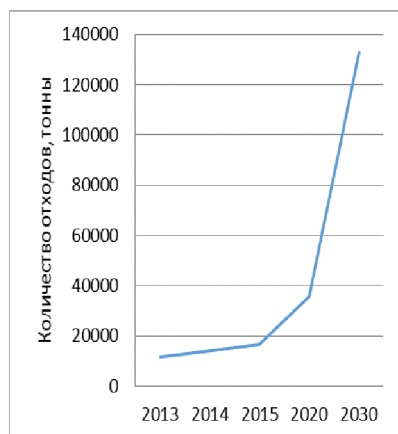


Рис. 2. Прогнозируемое увеличение отходов от солнечной энергетики.

Существующие решения проблемы

Одним из способов «решения» проблемы утилизации солнечных панелей является рынок отработанных панелей. По истечению эффективного срока использования установки, панели теряют часть своей эффективности (в среднем 15-25% КПД по истечению 20 лет), что для больших солнечных электростанций неприемлемо. Но возможно их дальнейшее использование на других объектах, например, таких как частные домовладения, т.к. для них столь незначительное снижение эффективности не критично.

После 20 летнего срока эксплуатации эффективность ФЭП начинает снижаться более интенсивно. Так что по истечении 50 лет их использование, будет совершенно нецелесообразно и потребуются их утилизация.

В Европейском Союзе существуют два законодательных акта, которые могли бы влиять на фотоэлектрическую индустрию. Это Закон об отходах производства электрического и электронного оборудования — Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) и Правила обращения с опасными материалами — Regulation of Hazardous Substances. Но ни один из этих документов не регулирует деятельность в производстве фотоэлектрических систем [8].

Однако некоторые страны самостоятельно принимают законы о переработке отходов, в том числе от солнечной электроэнергетики. Италия уже приняла закон, требующий, чтобы ее компании занимались рециклингом отходов, начиная с 2012 года.

Многие производители солнечной энергии в Европе взяли на себя обязательства по добровольной переработке отходов от своей деятельности.

13 августа 2012 года были приняты поправки к Директивам WEEE, которые требуют внесения поправок в национальные законодательства об обязательной переработки фотоэлектрических элементов. Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC — коалиция по солнечной токсичности силиконовой долины) утверждает, что для того, чтобы солнечная энергия по-настоящему была «зеленой», производители солнечных батарей должны сокращать и в конечном итоге полностью отказаться от использования токсичных материалов в производстве [4].

Часть фирм производящих солнечные панели, их переработку возлагают на себя.

Существующая система переработки в

настоящее время, в основном аналогична на всех предприятиях:

- вначале модули разделяются на части, затем перерабатываются в специальной мельнице до фракции с частицами размером менее 5 мм;
- полупроводниковая пленка удаляется в процессе выщелачивания, который занимает примерно 4–6 часов;
- стекло отделяется от жидкости в сепараторе;
- затем материал попадает на вибросито, который окончательно разделяет этиленовые и винилацетатовые фракции от стекла, которое попадает на очистку методом полоскания;
- после очистки стекло помещается в контейнеры для дальнейшей утилизации, а вода после промывки стекла фильтруется для извлечения металлов;
- соединения металлов выпадают в осадок в процессе выщелачивания с использованием гидроксида натрия. После этого они могут быть использованы в полупроводниковом производстве, в том числе производстве новых солнечных батарей.

Современный процесс переработки солнечных батарей может восстановить до 90% стекла, пригодного для использования в новых продуктах и до 95% полупроводниковых материалов для использования в новом производстве, в том числе фотоэлементов для солнечных батарей.

В будущем, автоматизированные процессы переработки сделают возможным достичь утилизации более 95% и восстанавливать сырье без затрат, или даже с прибылью. Рециклинг оказывает положительное воздействие на весь энергетический и экологический баланс фотогальванических технологий [4].

Результаты исследования

Существующая система утилизации является оптимальной на текущем уровне технологического развития, но, тем не менее, ее можно улучшить.

Процесс утилизации отработанных фотоэлектрических панелей, является крайне трудоемким и энергозатратным, к тому же в основном связан с отработанными кремневыми элементами, в то время как металлический корпус, электропроводка, распределительные щитки могут продолжать работать. Следовательно, если исключить из процесса утилизации эти

«неотработанные» элементы фотоэлектрического модуля, то можно значительно повысить экономическую эффективность не только самой переработки, но и цикла жизни панели в целом.

На данный момент, что бы переработать только кремневую часть фотопанели необходимо отделить ее от всей панели. Этот процесс потребует еще больше энергетических затрат чем просто переработка всей панели, т.к. она является монолитной.

Следовательно, для эффективного использования методики отдельной переработки необходимо модифицировать саму конструкцию панели. Текущие «монолитные» панели должны стать «пазлом», где все необходимые части панели соединяются друг с другом с помощью пазов и защелок.

Такая панель будет состоять из трех основных частей (рис. 3):

- 1) опора-корпус (рис. 3.а) – выполненная из алюминия или укрепленного пластика, будет содержать крепления под остальные элементы модуля, а так же иметь возможность крепления к другим аналогичным модулям.
- 2) распределительный щиток (рис. 3.б), будет содержать электрическую часть панели вместе с вводами для подключения кремниевого элемента и выводами для подключения модуля к инвертору.
- 3) фотоэлектрический преобразователь (рис. 3.в.), который должен будет претерпеть основные изменения.

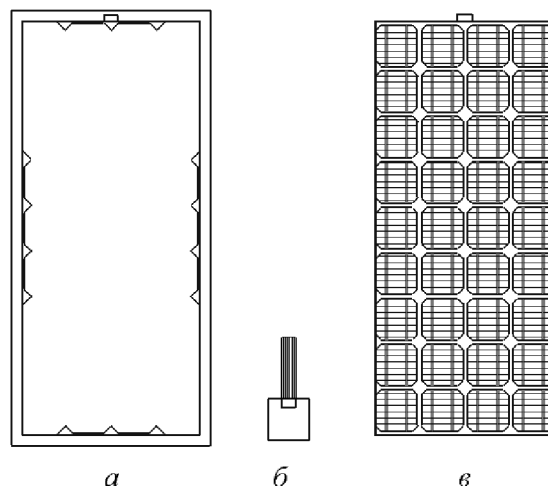


Рис. 3. Составные части сборной панели. (а - опора-корпус, б - распределительный щиток, в - фотоэлектрический преобразователь).

Фотоэлектрический преобразователь будет представлять собой трехслойную пластину, основанием которого является укрепленный пла-

стик, на который наносится второй слой – фотоэлектрический преобразователь, и в качестве третьего слоя устанавливается защитное светопроницаемое стекло. Подключение к распределительному щитку будет осуществляться с помощью шлейфа. Место соединения панели и корпуса, предусматривает небольшой зазор – повышающий теплоотдачу, за счет улучшенного отвода тепла с помощью воздуха.

Выводы

Массовое производство составных панелей потребует значительной модификации на предприятиях, что повлечет за собой дополнительные финансовые затраты. Но в длительной перспективе это может иметь высокую окупаемость.

Таким образом, при выходе панели из строя, потребуется лишь замена на новый отрабатанный элемент, который в дальнейшем отправляется на утилизацию.

Сам же процесс утилизации станет заметно проще: для корпуса – крупное дробление и переплавка, для фотоэлектрического преобразователя – мелкое дробление и переплавка с последующим разделением элементов с помощью химических реагентов, распределительный щиток как таковой не будет нуждаться в утилизации т.к. легко будет ремонтироваться на месте установки.

Список литературы

1. Ключев П.Г. «Солнечная энергетика: 2014» // Режим доступа: http://www.nanometer.ru/2010/08/23/12825909129704_216802.html
2. Указ Президента Российской Федерации от 4 июня 2008 г. N 889 "О некоторых мерах по повышению энергетической и экологической эффективности российской экономики" // Интернет-портал «Российской газеты» URL: <https://rg.ru/2008/06/07/ukaz-dok.html>
3. Типы солнечных батарей и их КПД // UTEM SOLAR URL: http://utem.org.ua/materials/show/tipy_solnechnyh_batarey
4. Кучеров А. В., Шибилева О. В. Использование солнечных батарей с учетом рециклинга // Молодой ученый. — 2014. — №11. — С. 166-168.
5. Кучеров А. В. Сравнительный технико-экономический анализ альтернативных источников энергии России / А. В. Кучеров, О. В. Шибилева // Известия высших учебных заведений. Серия: Экономика, финансы и управление производством. 2012. - № 03. - С. 108–111.
6. Бобров П. Тара Солнца / П. Бобров // http://one_vision.jofo.ru/212950.html
7. Фотоэлемент // Wikipedia Modernized URL:

<http://www.wikiwand.com/ru/Фотоэлемент>

8. Рустамов Н. А. Стандартизация и нетрадиционная энергетика / Н. А. Рустамов, Т. И. Андреев, К. В. Чекарев // ЭСКО Электронный журнал энергосервисной компании «Экологических систем», 2007. — №6(6).

References

1. Klyuev, P. G., "Solar energy: 2014" // access Mode: http://www.nanometer.ru/2010/08/23/12825909129704_216802.html
2. The decree of the President of the Russian Federation of 4 June 2008 № 889 "On some measures to improve energy and environmental efficiency of Russian economy" // Internet-portal "Rossiyskaya Gazeta" URL: <https://rg.ru/2008/06/07/ukaz-dok.html>
3. Types of solar panels and their efficiency // UTEM SOLAR URL: http://utem.org.ua/materials/show/tipy_solnechnyh_batarey
4. Kuchеров, A. V., O. V. Sibilev the use of solar batteries subject to recycling // Young scientist. - 2014. - No. 11. - P. 166 to 168.
5. Kuchеров A.V. Comparative technico-economic analysis of alternative sources of energy of Russia / A.V.Kuchеров, A.V.Shipileva // news of higher educational institutions. Series: Economics, Finance and production management. 2012. - № 03. - P. 108-111.
6. Bobrov P. Tara Sun / P. Bobo-ROV // http://one_vision.jofo.ru/212950.html
7. Photocell // Wikipedia Modernized URL: <http://www.wikiwand.com/ru/Фотоэлемент>
8. Rustamov N. A. Standardization and unconventional energy / N. A. Rustamov, T. I., Andreenko, K. V. Sekarev // ESCO Electronic journal of Energizer-service company

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

УДК 574

К вопросу очистки газовых выбросов от сероводорода, сероуглерода и сернистого ангидрида

В.А. Пухлий¹, А.А. Журавлев¹, К.В. Пухлий²

ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», Университетская-33,
г. Севастополь, 299053, Россия. ¹pu1611r@rambler.ru, ²Предприятие «Аэротекс», РФ, г.Москва,
ул.Мурановская, 17-147, kirill.pukhliy.99@mail.ru

Статья поступила 17.05.2017 г.; после доработки 19.05. 2017 г.

Аннотация

В статье рассматриваются процессы очистки газовых выбросов от сернистых соединений (сероводорода, сероуглерода и сернистого ангидрида) и др. Приводится проект пилотной установки очистки газов от сероводорода и сернистого ангидрида, основанный на адсорбционном способе очистки.

Ключевые слова: Газовые выбросы, очистка, сернистые соединения, адсорбция, цеолиты.

To a question of clearing of gas emissions from hydrogen sulphide, sulphur carbon and sulphurous anhydride

V.A.Pukhliy¹, A.A.Zhuravlev¹, K.V.Pukhly²

Sevastopol state university, 33 Universitetskaya st., Sevastopol, 299053, Russia,
¹pu1611@rambler.ru, ²Aeroteks Enterpraise, Moscow, Muranovskaya st., 17-147

Received 17.05.2017 y.; received in final form 19.05.2017 y.

Abstract

In article processes of clearing of gas emissions from sulphurous connections (hydrogen sulphide, sulphurous anhydride) are considered, etc. the project of pilot installation of clearing of gases from hydrogen sulphide and the sulphurous anhydride, based on adsorption.

Keywords: gas emissions, clearing, sulphurous connections, adsorption, zeolites.

Введение

Целесообразность того или иного способа очистки газов от сернистых соединений – сероводорода, сернистого ангидрида, сероуглерода (H_2S , SO_2 , CS) зависит от многих факторов и определяется производительностью установки, составом газа, концентрацией сернистых соединений и других примесей, требованиями потребителя к очищенному газу, необходимостью селективного извлечения сернистых соединений.

В зависимости от конкретных условий

производства очистка газов от сернистых соединений может осуществляться различными способами: абсорбционными, адсорбционными и др.

Значительное место среди них занимают адсорбционные процессы, которые наряду с извлечением сернистых соединений обеспечивают глубокую осушку газов.

В настоящей работе излагается расчет пилотной установки для очистки газовых выбросов от H_2S и SO_2 (при малой концентрации

последних) в присутствии в газах значительных количеств CO_2 на основе метода адсорбции с использованием молекулярных сит (цеолитов).

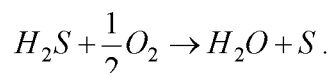
Постановка цели и задач научного исследования

Целью научной работы является анализ процессов очистки газовых выбросов от сернистых соединений (сероводорода и сернистого ангидрида).

Рассматривается проект пилотной установки очистки газов от H_2S и SO_2 , основанный на адсорбционном способе очистки.

Адсорбционные процессы очистки

В промышленности часто возникает необходимость в сероочистке газов, содержащих незначительное количество H_2S (менее 0,1% по объему). Очистка таких газов абсорбционными методами оказывается малоэффективной. Более рациональным в таких случаях является применение адсорбционных способов сероочистки, так как твердые сорбенты характеризуются высокой поглотительной способностью при низких парциальных давлениях удаляемых компонентов. Многочисленными исследованиями была показана значительная сорбционная емкость синтетических цеолитов по отношению к сероводороду, а их уникальная способность катализировать реакцию Клауса уже при комнатной температуре позволила создать адсорбционно-каталитические способы сероочистки:



В этих процессах используется высокая избирательность цеолитов по отношению к полярным и ненасыщенным соединениям. Например, такие полярные соединения как вода, сероводород, сернистый ангидрид, метанол и др. значительно лучше адсорбируются из смеси неполярных газообразных и жидких углеводородов.

Отличительной особенностью адсорбционного процесса на цеолитах является тот факт, что наряду с тонкой очисткой газа от всех соединений серы происходит и его глубокая осушка [1]. Применение молекулярных сит позволяет производить эффективную очистку газа при больших линейных скоростях газа в зоне сорбции, что в свою очередь дает возможность сократить размеры адсорберов, а также совместить тонкую очистку газов от сернистых соединений с его глубокой осушкой.

Следует отметить, что остальные адсорбен-

ты (активные угли, силикагели, алюмогели) имеют значительно более низкую сероёмкость, нежели цеолиты. Для повышения избирательности активных углей к серосодержащим соединениям изучены различные способы химического модифицирования их поверхности. Предложена, например, пропитка активных углей солями различных металлов.

Для очистки газа от H_2S и COS используется активированный уголь с удельной поверхностью 200 - 2000 м²/г, промотированный соединениями меди и щелочного или щелочно-земельного металла. В ряде случаев предлагается в состав промотора активированного угля помимо солей меди вводить соли других металлов. Соединения меди наносятся на активированный уголь в количестве до 10% (по массе) в виде карбоната, нитрата, галогенида, сульфата, ацетата и др.

Активированный уголь, пропитанный раствором $CuSO_4$, до содержания 10% имеет динамическую активность по меркаптанам в 20 раз большую, чем исходный адсорбент. Это объясняется, с одной стороны, хемосорбцией меркаптанов солями меди, с другой – окислением их до дисульфидов, имеющих значительно больший молекулярный вес и два атома серы в молекуле, что также способствует лучшей сорбируемости. Однако, несмотря на повышенную поглотительную способность промотированных адсорбентов, широкого промышленного применения для очистки газа от сернистых соединений они не нашли из-за высокой стоимости и быстрой потери активности в процессе многоциклового эксплуатации. Поэтому промотированные сорбенты целесообразно использовать лишь для очистки небольших объемов газов, концентрация сернистых соединений, в которых значительно снижена на предварительных ступенях очистки.

Синтетические цеолиты обладают рядом уникальных свойств, отличающих их от адсорбентов других типов, из которых для целей сероочистки первостепенное значение имеют следующие:

- ярко выраженная избирательность адсорбции полярных молекул;
- высокая адсорбционная емкость при повышенных температурах (до $T = 100^\circ C$) и малых парциальных давлениях извлекаемого компонента;
- близость диаметров входных окон в полости цеолита к размерам молекул, что позволяет осуществить селективную адсорбцию.

В таблице 1 приводятся данные по емкости

различных адсорбентов по отношению к сульфиду водорода при $T = 30^{\circ}\text{C}$ и $P_{H_2S} = 50$ мм. рт. ст., которая показывает, что наибольшей емкостью по H_2S обладают цеолиты.

Высокая емкость цеолитов по серосодержащим компонентам обусловлена наличием сильного электростатического поля в адсорбционных полостях. Изучен механизм адсорбции H_2S и других сероорганических соединений

на цеолитах и показано, что при адсорбции имеет место взаимодействие атома серы с обменными катионами и протонами



сила которого определяется, с одной стороны электронодонорными свойствами атома серы в молекулах адсорбатов, а с другой – акцепторными свойствами катионов на поверхности цеолитов.

Таблица 1. Емкость различных адсорбентов по H_2S .

№ п/п	Адсорбент	Удельн. пов-сть, м ² /г	Кол-во адсорбированного H_2S	
			мг/м ²	мг/г
1.	Магнийевый силикат ($SiO_2/MgO = 1,62$)	428,6	0,0553	23,65
2.	Магнийевый силикат ($SiO_2/MgO = 2,28$)	324,5	0,0654	21,23
3.	Силикагель	313,2	0,0245	7,67
4.	Активированный уголь	1285,5	0,0229	29,28
		1209,0	0,0319	38,60
		495,0	0,07807	38,75
5.	Цеолит F-9	–	–	102,35
	Цеолит 13X	–	–	91,10
	Цеолит 5A	–	–	91,54

В таблице 2 приводятся данные о влиянии типа цеолита и основности обменного катиона на адсорбционную емкость различных цеолитов по H_2S в динамических условиях (скорость газа 0,03 м/с, концентрация $H_2S = 0,01\%$ по объему, газ – носитель: азот).

Замена части катионов натрия катионами

калия с большей основностью приводит к увеличению емкости цеолитов.

Причиной повышенной емкости цеолитов типа X по сравнению с цеолитами типа Y является более высокая концентрация катионов в первых.

Таблица 2. Адсорбционная емкость различных цеолитов по H_2S в динамических условиях.

№ п/п	Адсорбент	Удельн. пов-сть, м ² /г	Кол-во адсорби-рованного H_2S	
			мг/м ²	мг/г
1.	Магнийевый силикат ($SiO_2/MgO = 1,62$)	428,6	0,0553	23,65
2.	Магнийевый силикат ($SiO_2/MgO = 2,28$)	324,5	0,0654	21,23
3.	Силикагель	313,2	0,0245	7,67
4.	Активированный уголь	1285,5	0,0229	29,28
		1209,0	0,0319	38,60
		495,0	0,07807	38,75
5.	Цеолит F-9	–	–	102,35
	Цеолит 13X	–	–	91,10
	Цеолит 5A	–	–	91,54

На рис. 1 приведены изотермы адсорбции H_2S (сплошные линии) и этилмеркаптана (пунктирные линии) на различных цеолитах.

Как следует из рис. 1 наибольшей адсорбционной емкостью почти во всем интервале парциальных давлений H_2S и этилмеркаптана обладает цеолит NaX.

Однако следует отметить, что целесообраз-

ность выбора того или иного типа цеолита для решения конкретных задач во многом определяется составом газов. В отличие от цеолитов с меньшим размером входных окон в адсорбционные полости (NaA , CaA) цеолиты NaX поглощают все молекулы с эффективным диаметром менее $9 \text{ \AA}$.

Наибольшее влияние на емкость цеолитов

по сернистым соединениям оказывают пары воды.

В случае очистки влажных газов вода сорбируется в лобовых слоях цеолита, практически полностью вытесняя из пор сернистые соединения.

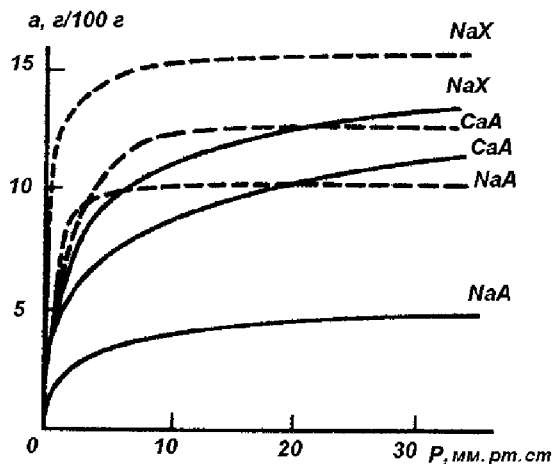


Рис. 1. Изотермы адсорбции H_2S и этилмеркаптана на различных цеолитах.

Присутствие в очищаемом газе CO_2 , особенно в больших количествах, обуславливает возникновение совместной адсорбции, которая снижает емкость цеолитов по H_2S и меркаптанам.

Распределение соединений в слое цеолита CaA при совместной адсорбции H_2O , CO_2 и H_2S показано на рис. 2.

Как следует из рис. 2 при совместной адсорбции воды, диоксида углерода и сульфида водорода слой цеолита может быть разбит на три основные зоны: зона равновесной адсорбции воды (L_{H_2O}), зона совместной адсорбции H_2S и CO_2 (L_{H_2S,CO_2}) и зона массопереноса H_2S (L_{H_2S}), где имеет место вытеснение диоксида углерода сульфидом водорода. Высота слоя, используемая для адсорбции H_2O , может быть рассчитана по формуле:

$$L_{H_2O} = \frac{(F_w)_{H_2O} \cdot \tau}{a_{H_2O} \cdot \rho_{ад} \cdot S} \cdot 10^2,$$

где F_w – массовый расход газа, г/нм³;

a_{H_2O} – адсорбционная емкость цеолита по воде, г/100 г;

$\rho_{ад}$ – плотность адсорбента, г/см³;

S – площадь поперечного сечения адсорбера, см².

При этом предполагается, что величина динамической активности цеолита по воде составляет 60% от статической при данном парциальном давлении.

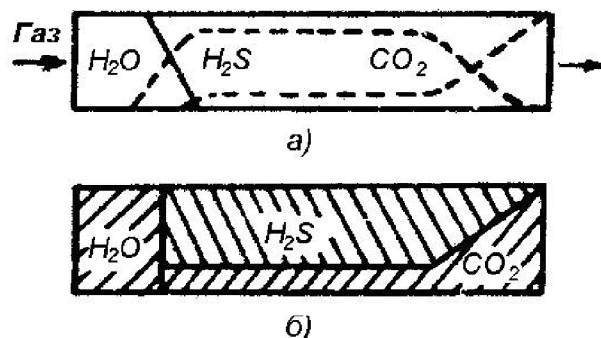


Рис. 2. Распределение соединений в слое цеолита: а) реальное; б) модель.

Высота зоны совместной адсорбции H_2S и CO_2 – L_{H_2S,CO_2} рассчитывалась по аналогичной формуле. Высота зоны массопередачи сульфида водорода – L_{H_2S} в значительной мере определяется отношением $CO_2 : H_2S$ в газе и массовым расходом H_2S . На рис. 3 приводится зависимость высоты L зоны массопередачи H_2S от соотношения парциальных давлений CO_2 и H_2S .

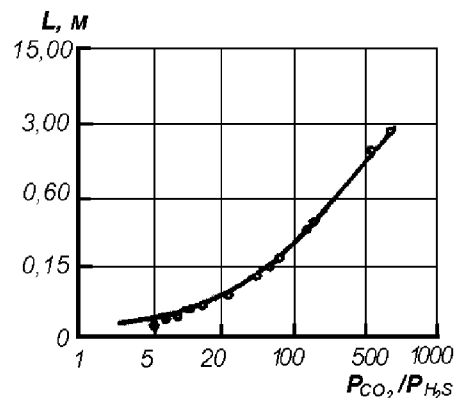


Рис. 3. Зависимость высоты L зоны массопередачи H_2S от соотношения P_{CO_2}/P_{H_2S} .

Кроме указанных зависимостей на размеры всех зон оказывают влияние продолжительность адсорбции, температура процесса, размер пор цеолита, полнота десорбции всех компонентов на стадии регенерации, углеводородный состав очищаемого газа.

В заключение следует отметить, что введение требования о необходимости селективной

очистки газов от H_2S в присутствии CO_2 приводит к резкому сокращению числа пригодных процессов.

На рис.4 приведены области применения различных процессов для очистки природных газов от H_2S в отсутствие примесей (парциальное давление H_2S в очищенном $P_{H_2S}^{очищ}$ и исходном $P_{H_2S}^{исх}$ газах) [2].

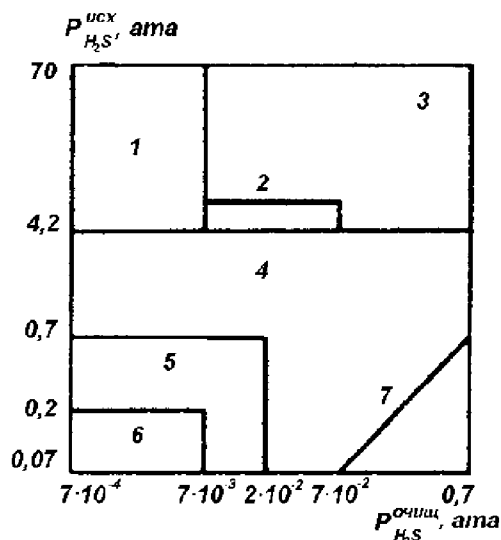


Рис. 4. Области применения различных процессов для очистки природного газа от H_2S в отсутствие примесей.

На рис. 4 цифрами обозначено: 1 – процессы «Эконамин», «Селексол», «Сульфинол» или ДЭА при больших нагрузках; 2 – физические растворители; 3 – «Сульфинол» или физические растворители; 4 – АДІП, «Эконамин», «Сульфинол» или ДЭА при высоких нагрузках; 5 – «Эконамин», «Сульфинол», «Стретфорд» или «Ветрокок»; 6 – «Стретфорд» или «Ветрокок», 7 – линия равных парциальных давлений на входе и выходе газа.

Для сравнения на рис. 5 показаны области применения различных процессов для селективного удаления H_2S из природного газа в присутствии CO_2 (концентрация H_2S в очищенном газе $C_{H_2S}^{очищ}$, парциальное давление H_2S в исходном газе $P_{H_2S}^{исх}$). На рис. 5 цифрами обозначено: 1 – «Ректизол» или «Селексол»; 2 – АДІП; 3 – «Стретфорд», «Ветрокок» или АДІП; 4 – линия равных парциальных давлений на входе и выходе газа.

Следует также отметить тот факт, что се-

ллективность цеолитов по отношению к сернистым соединениям зависит от температурных условий.

В работах Н.В. Кельцева [3] и др., посвященных изучению адсорбционного равновесия для смеси H_2S с пропаном и бутаном на цеолитах NaX и CaA при различных температурах, получено резкое уменьшение коэффициента разделения по сульфиду водорода с ростом температуры.

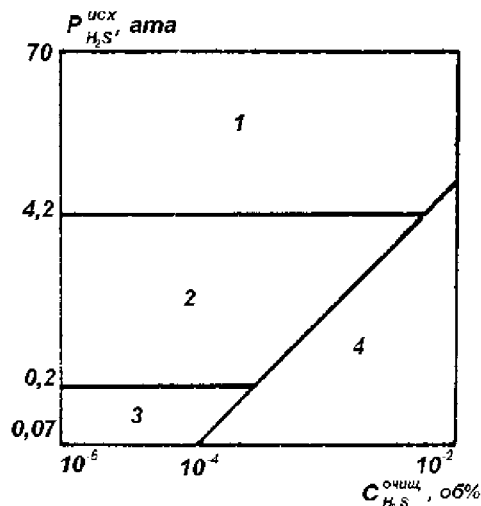
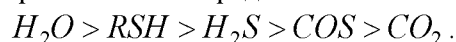


Рис. 5. Области применения различных процессов для селективного удаления H_2S из природного газа в присутствии CO_2 .

По сорбируемости на цеолитах соединения, входящие в состав очищаемых газов, могут быть расположены в ряд:



Сорбируемость углеводородов возрастает по мере увеличения их молекулярного веса. Факты соадсорбции компонентов очищаемого газа, изменения его состава во времени должны быть учтены на стадии проектирования. Анализ возможного влияния соадсорбции компонентов позволит правильно рассчитать размеры аппаратуры, продолжительность стадии очистки, условия проведения процессов адсорбции и регенерации, правильно выбрать тип цеолита в зависимости от поставленной цели.

Регенерация цеолитов в процессах сероочистки

Процессы адсорбционной очистки газов от сернистых соединений являются периодическими. После появления за слоем адсорбента сернистых соединений в количестве, определяемом требованиями потребителя, сорбент под-

вергают регенерации. Регенерацию цеолитов проводят путем продувки слоя нагретым очищенным газом или путем снижения давления в системе.

Первый способ является более распространенным. Температурный режим регенерации выбирают исходя из условий десорбции наиболее сильно адсорбируемого компонента, входящего в состав очищаемого газа. Таким компонентом, как правило, являются пары воды. Сильное взаимодействие между полярными молекулами воды и элементами кристаллической структуры цеолита требует применения на стадии регенерации более высоких температур, чем это необходимо для удаления сернистых соединений.

Обычно регенерацию цеолитов с целью их подготовки к следующему циклу адсорбции проводят при температурах $T = 300 - 320^\circ\text{C}$.

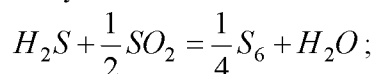
Утилизация газов регенерации

При промышленной реализации адсорбционных процессов сероочистки приходится решать вопрос утилизации газов регенерации в которых концентрируются сернистые соединения. Выбор рациональной схемы обработки газов регенерации во многом определяет экономику процесса в целом.

Газы регенерации от адсорбционных установок небольшой производительности обычно используют в качестве топлива в технологических печах, например, в процессах получения газовой серы.

В установках адсорбционной очистки большой мощности газы регенерации подвергаются обработке с целью выделения из них сернистых соединений. Способ обработки зависит от состава сернистых соединений и их концентрации.

Если в газах регенерации содержится в основном H_2S и небольшое количество сероорганических соединений, применяются в основном аминовые процессы или процесс «Сульфиднол». Кислые газы регенерации адсорбентов перерабатываются в элементарную серу по методу Клауса:



$$\Delta H = -476 \text{ ккал/моль.}$$

Реакция сопровождается выделением большого количества тепла, в результате чего температура слоя повышается до $T = 220 - 290^\circ\text{C}$. Процесс сероочистки с химической регенерацией

рентабелен для переработки газа как низкого, так и высокого давления при производительности более 10 т серы в сутки. В этом случае капиталовложения составляют 60 - 70%, а эксплуатационные расходы – 35-65% по сравнению с комплексной схемой подготовки газа, включающей очистку амином, осушку и конверсию H_2S на катализаторе Клауса. Следует однако отметить, что схемы очистки с химической регенерацией адсорбента широкого распространения не получили, что связано прежде всего с трудностью удаления серы из пор цеолита.

Расчет пилотной установки для очистки газовых выбросов от сероводорода и сернистого ангидрида

В промышленности в основном разработаны способы очистки газов, содержащих H_2S и SO_2 для значительных концентраций последних. Эти способы широко используются при переработке нефтяных газов [4].

В настоящем разделе излагается расчет пилотной установки для очистки газовых выбросов от малосернистых газов ($H_2S - 0,04\%$ и $SO_2 - 0,05\%$ по объему), выполненный предприятием АО «Аэротекс» для одного из химических предприятий России.

Существенной особенностью проекта является тот факт, что газовые выбросы содержат значительное количество кислорода (14,58% по объему) и что особенно важно, большое количество CO_2 (6,57% по объему). Большое количество кислорода и углекислого газа в газовых выбросах делают очистку весьма затруднительной и полностью исключают абсорбционные методы очистки.

Кроме того, большое количество CO_2 исключает селективное извлечение из газовых выбросов H_2S в присутствии CO_2 . Коэффициент K , характеризующий отношение концентраций имеет в этом случае значение:

$$K = \frac{C_{CO_2}}{C_{H_2S}} = \frac{6,57}{0,04} = 166.$$

На основе исследований, выполненных НИИОГАЗом следует, что абсорбционные методы извлечения H_2S из газовых выбросов в присутствии CO_2 имеют ограниченный диапазон применения, который не превышает 5.

Ввиду этого предприятие АО «Аэротекс»

разработало способ очистки газовых выбросов от H_2S и SO_2 в присутствии CO_2 на основе метода адсорбции с использованием молекулярных сит (цеолитов) [5].

Схема очистки отходящих газов от шахтных печей производства натрия сернистого заключается в двухступенчатой адсорбционной очистке от H_2S , SO_2 с использованием цеолитов NaX .

Предварительная пылеочистка отходящих газов от пыли кокса – C , сульфатной пыли – Na_2SO_4 и сульфидной пыли Na_2S осуществляется в групповых циклонах ЦН-15 (грубая очистка). Очистка от мелкодисперсной пыли осуществляется в металлопористых пылеуловителях марки МПП-30 [6].

Исходные данные и физико-химические свойства газовой смеси

Состав смеси (% по объему):

H_2S – 0,04; H_2O – 3,37; O_2 – 14,58;
 SO_2 – 0,05; CO_2 – 6,57; N_2 – 74,12;
 CO – 1,27.

Производительность: $V = 60000$ м³/ч при $T = 90^\circ C$. Давление поступающей смеси: $P = 100000$ Па. Температура газа, поступающего в адсорберы $T_{гн} = 35^\circ C$. Содержание H_2S в очищенном газе: 0,005 г/м³. Физико-химические свойства газовой смеси при $T_{гн} = 35^\circ C$ приводятся в таблице 3.

Таблица 3. Физико-химические свойства газовой смеси при температуре $T_{гн} = 35^\circ C$.

№ п/п	Компоненты	y_i , % об.	Мол. масса M_i , кг/кмоль	y_i , % масс.	Теплоемкость среды кДж/кг [°] К	Вяз-сть μ_i , мПас	Т крит. [°] К	Теплопр., λ_i , Вт/м [°] К
1.	H_2S	0,04	34	0,046	1,009	0,0132	373,4	0,0135
2.	SO_2	0,05	64	0,11	0,627	0,0135	430,5	0,0097
3.	CO	1,27	28	1,21	1,044	0,0197	132,7	0,0256
4.	H_2O	3,37	18	2,07	1,876	0,0110	647,2	0,0183
5.	CO_2	6,57	44	9,86	0,851	0,0154	304,0	0,0151
6.	O_2	14,58	32	15,91	0,924	0,0210	154,6	0,0275
7.	N_2	74,12	28	70,79	1,040	0,0181	126,0	0,0267
		$\Sigma y_i = 100$	$M_{ср} = 29,3$		$C_{р см} = 1,02$	$\mu_{см} = 0,0179$		$\lambda_{см} = 0,0265$

Описание технологической схемы очистки газа от сероводорода и сернистого ангидрида

Технологическая схема очистки отходящих газов от H_2S и SO_2 представлена на рис. 6. На технологической схеме очистки отходящих газов обозначены: А1-2 – адсорбер-осушитель (6 шт.); А3-4 – адсорбер-поглотитель H_2S (6 шт.); А5 – адсорбер-поглотитель SO_2 (1 шт.); Х1 – холодильник исходного газа (1 шт); Х2 – холодильник осушенного газа (1 шт); Х3 – холодильник очищенного газа (1 шт); К1 – конденсатор водяных паров (1 шт); К2 – конденсатор серы (1 шт); П – печь (1 шт); МПП-30 – металлопористый пылеуловитель (2 шт).

Наименование сред в трубопроводах следующее: В4 – вода обратная; 3 – воздух; 31 – паро-воздушная смесь; 33 – исходный газ на очистку; 34 – очищенный охлажденный газ; 35

– выходящий регенерирующий газ; 36 – выходящий регенерирующий газ после конденсации; 37 – осушенный исходный газ; 38 – очищенный газ перед подогревом; 40 – сера жидкая; Т1 – горячий очищенный газ на регенерацию; Т8 – конденсат. Отходящие газы от шахтных печей производства натрия сернистого после грубой пылеочистки в группе циклонов ЦН-15 поступают на тонкую пылеочистку в металлопористые пылеуловители марки МПП-30 [6].

После пылеочистки исходный газ через вентиль В2 поступает в холодильник Х1, где охлаждается до температуры $T = 35^\circ C$ оборотной водой. Охлажденный газ поступает параллельно в три адсорбера-осушителя А1 или А2 через В4 или В7.

На технологической схеме (рис.6) вместо трех адсорберов А1 или А2 показан один. Если адсорберы А1 находятся в стадии адсорбции, а адсорберы А2 – в стадии регенерации и последующего охлаждения, то дальнейшая работа

установки идет следующим образом.

Осушенный газ через вентиль В17, проходя через холодильник Х2, служащий для снятия теплоты адсорбции, подается в адсорберы А3 или А4, также установленные по три параллельно. Если адсорберы А3 работают в стадии адсорбции H_2S , а адсорберы А4 – в стадии регенерации и последующего охлаждения, то

дальнейшая работа установки идет следующим путем. Осушенный газ через вентиль В10 проходит адсорберы А3 и выходит через вентиль В24.

Полученный очищенный газ делится на три потока вентилями В28, В29, В30. Часть очищенного газа через В30 подается в печь П, где нагревается до температуры $T = 350^\circ\text{C}$.

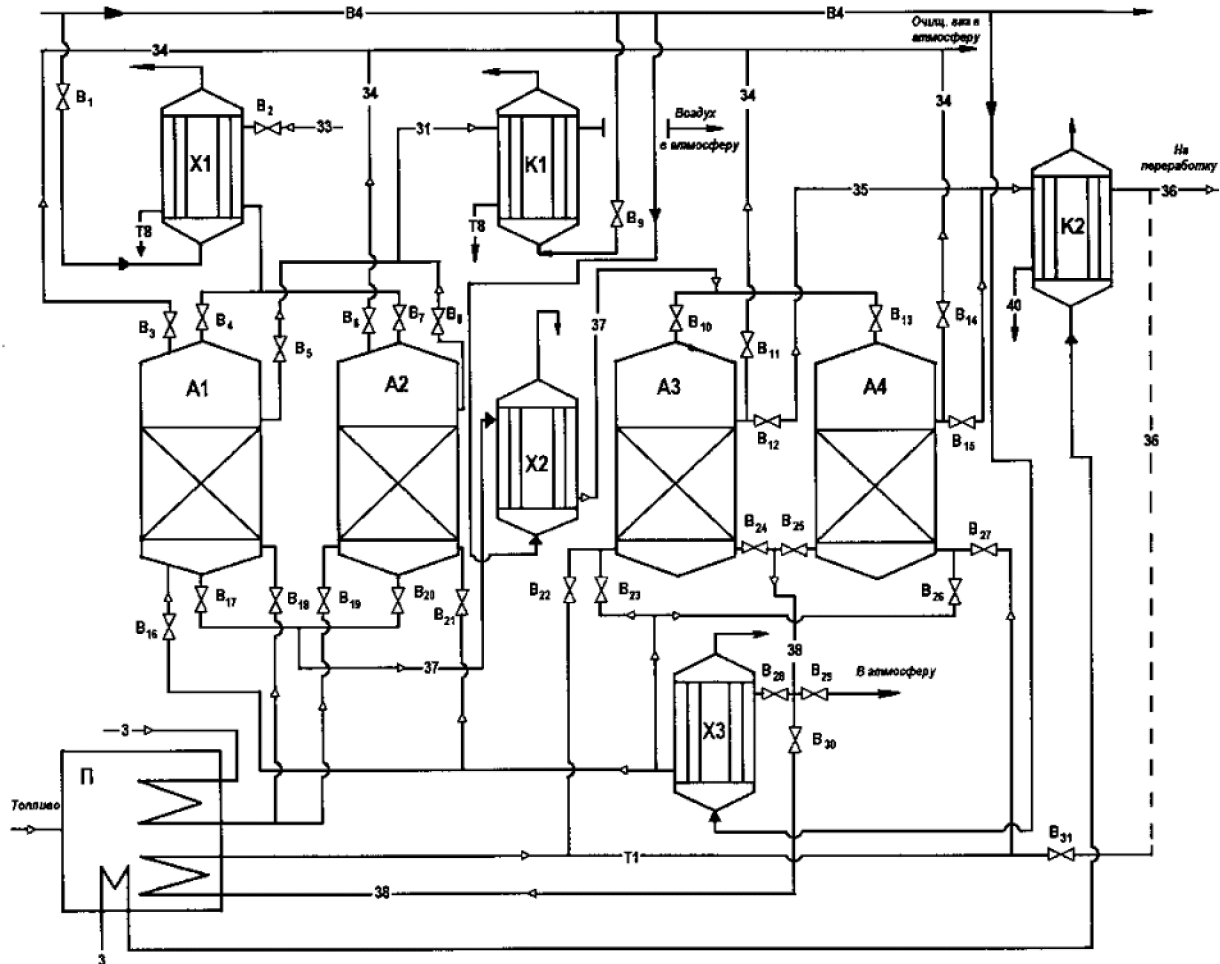


Рис. 6. Технологическая схема установки по очистке отходящих газов от H_2S и SO_2 [5].

Нагретый газ через вентиль В27 подается в адсорберы А4 для регенерации цеолита. Регенерирующий газ, насыщенный углекислотой, диоксидом серы, элементарной серой и в малой степени водой, подается через вентиль В15 в конденсатор К2, где конденсируется сера и происходит частичное охлаждение газа.

Отработанный регенерирующий газ может быть частично рециркулирован через вентиль В31 для смешивания с регенерирующим газом, что позволит уменьшить долю окисленной серы регенерации и увеличить долю элементарной серы.

После стадии регенерации адсорберы А4 охлаждаются частью очищенного газа, проходящего через вентиль В28, холодильник Х3 и

далее через вентиль В26. Охлаждающий газ выходит из адсорберов А4 через вентиль В14.

Работа адсорберов А3 и А4 в стадии адсорбции и регенерации – охлаждения происходит попеременно. Осушитель газа А2, находящийся в стадии регенерации и последующего охлаждения, работает следующим образом. Атмосферный воздух, подогретый в печи П, подается через вентиль В19 в адсорберы А2, регенерирует силикагель, охлаждаясь при этом, и выходит через вентиль В8 затем проходит конденсатор К1, где газ охлаждается и освобождается путем конденсации от большей части воды. Охлажденный воздух выбрасывается в атмосферу.

Стадия охлаждения адсорбера А2 осу-

шествывается частью охлажденного очищенного газа, поступающего из адсорберов А3 или А4 через холодильник Х3 и вентиль В21.

Адсорберы А1 и А2 в стадиях адсорбции и регенерации – охлаждения работают попеременно.

Материальный баланс адсорбционной установки:

- срок работы цеолита (без дополнения) 24 месяца;
- расход цеолита 49,0 тонн в год;
- срок работы силикагеля: 18 месяцев;
- расход силикагеля: 72,96 тонн в год;
- выход серы в адсорберах: 25,9 кг/час;
- расход воды: 540 м³/час.

В технологической схеме предусматриваются к установке два насоса (один резервный). Марка насоса Х500/25. Производительность $Q = 0,15$ м³/с, напор $H = 19$ м. Мощность электродвигателя насоса $N = 55$ кВт.

Общий расход эл/энергии следующий:

- осевой компрессор для подачи газа $N = 730$ кВт;
 - осевой компрессор для наружного воздуха $N = 620$ кВт;
 - насос оборотной воды Х500/25 $N = 55$ кВт;
 - металлопористый пылеуловитель марки МПП-30 $N = 80$ кВт;
- Всего: $N = 1485$ кВт.

Мероприятия по технике безопасности. «Азотное дыхание»

Расчетное определение категории взрывоопасности технологических блоков для технологической установки по очистке отходящих газов от сероводорода и сернистого ангидрида производится по «Общим правилам взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» [7]. Приводится методика расчета, ранее изложенная в [11].

Мероприятия по технике безопасности в процессе очистки отходящих газов от H_2S и SO_2 разработаны на основе нормативных документов [7, 8] и справочных данных [9,10]. Процесс очистки газов от H_2S и SO_2 проводится в герметическом оборудовании.

Герметизация оборудования и коммуникаций обеспечивается за счет применения фланцевых соединений типа «гладкая с уплотнительной канавкой». Все оборудование с приводами укомплектовано электродвигателями во взрывобезопасном исполнении в соответствии с ПУЭ [8] и категорией и группой взрывоопасных смесей [7].

В установке все аппараты, содержащие взрыво- и пожароопасные газы, подключены к системе «азотного дыхания» с избыточным давлением $P = 0,03$ ати.

Заключение

По состоянию развития адсорбционной техники на сегодняшний день область применения адсорбционных процессов для очистки природных и промышленных газов от сернистых соединений определена в общих чертах так: это очистка малосернистых газов от H_2S при высоком мольном соотношении CO_2/H_2S , подготовка газа перед криогенными установками, очистка природного газа, а также газообразных и жидких фракций переработки нефти от меркаптанов (C_2H_5SH).

Приводится проект пилотной установки очистки газов от H_2S и SO_2 , основанный на адсорбционном способе очистки.

Проведенные исследования показывают, что конкурировать с предложенным процессом может метод адсорбции, основанный на окислении H_2S и SO_2 , до SO_3 с получением серной кислоты и сульфата калия при каталитическом участии активных углей. Существующие в промышленности установки по сероочистке, использующие активные угли: процесс «Штратмана» - окисление SO_2 и процесс «Дезорекс» - окисление H_2S , обладают целым рядом достоинств. Они имеют меньший объем аппаратуры и менее энергоёмки. Однако для окончательного решения необходимо провести лабораторные испытания по удалению H_2S и SO_2 из отходящих газов данного состава путем окисления на активных углях и цеолитах.

Список литературы

1. Кулиев А.М., Багуров Р.А. и др. Осушка и очистка природного газа от сероводорода. - Газовая промышленность, №7, 1974, с.39-41.
2. Кузьменко Н.М. и др. Адсорбционная очистка природного газа от сернистых соединений. - Промышленная и санитарная очистка газов. Серия ХМ-14. - М., 1987. - 36 с.
3. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. - М.: Химия, 1984. - 592 с.
4. Воронцова В.А. Очистка природного газа от H_2S , CO_2 и удаления влаги с помощью молекулярных сит. - Газовая промышленность, №1, 1972, с.45-46.
5. Пухлій В.О. Установка для очищення газів від сірководню та двооксиду сірки. - Заявка на патент України №2003065887 - Київ, Укрпатент, 2003.
6. Пухлій В.О. Пиловоловлювач металопористий.

- Патент України №39474А. – Київ, Укрпатент, Бюл.№5, 2001.
7. Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств. ПБ 09-170-97. – СПб.: Изд-во «ДЕАН», 2001. – 112 с.
 8. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – М.: Изд-во Минэнерго и электрофикации, 1980.
 9. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность: Справочник. Под ред. А.Н.Баратова. – М.: Химия, 1987. – 270 с.
 10. Розловский А.И. Научные основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами и парами. – М.: Химия, 1972. – 365 с.
 11. Пухлий В.А., Журавлев А.А., Пухлий К.В. Определение категории взрывоопасных и технологических блоков при очистке сточных вод от метанола и ацетона. – Энергетические установки и технологии: научн. журнал. - Севастополь: ФГАОУ ВО СевГУ, 2016, том 2, №4, с.90-98.

References

1. Kuliev A.M., Bagurov R. A, etc. Drainage and clearing of natural gas of hydrogen sulphide. - The gas industry, №7, 1974, p.39-41.
2. Kuzmenko N.M., etc. Adsorption cleanup of natural gas of sulphurous connections. - Industrial and sanitary clearing of gases. Series XM-14. - M, 1987. - 36 p.
3. Kelzev N.V. Bas adsorption technicians. - M: Chemistry, 1984. - 592 p.
4. Vorontsova V. A. Cleanup of natural gas from H₂S, CO₂ and removals of a moisture by means of molecular sieves. - The Gas industry, №1, 1972, p.45-46.
5. Pukhliy V.A. Machine for cleating of gas from sulphur carbon that sulphurons anhydride. - Patent of Ukraine №2003065887 - Kiev, 2003.
6. Pukhliy V.A. Machine for catch of dust. Patent of Ukraine №39474А. - Kiev, Bulletin № 5, 2001.
7. The general explosion safety rules for explosion and fire dangerous chemical, petrochemical and oil refining manufactures. ПБ 09-170-97. - SPb.: Publishing house "ДЕАН", 2001. - 112 p.
8. Rules of the device of electroinstallations (PUE). - M: Publishing house Ministry power industry, 1980.
9. Fire safety. Explosion safety: the Directory. Under the editorship of A.N.Baratova. - M: Chemistry, 1987. - 270 p.
10. Rozlovsky A.I. Scientific of a basis of technics of explosion safety at job with combustible gases and steams. - M: Chemistry, 1972. - 365 p.
11. Pukhliy V. A, Zhuravlev A.A., Pukhliy K.V. Definition of a category of explosive and technological blocks at sewage treatment from metanol and acetone. - power installations and technologies:scient. Magazine. - Sevastopol: FGAOU SevSU, 2016, volume 2, №4, p.90-98.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ В ЖУРНАЛЕ «ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»

Журнал входит в национальную библиографическую базу данных РИНЦ.

В журнале публикуются результаты исследований по следующим направлениям:

- тепловые и ядерные энергетические установки;
- электротехнические комплексы и сети;
- нетрадиционные и возобновляемые источники энергии;
- экологическая безопасность;
- химические технологии атомных станций;
- информационные технологии в энергетике;
- моделирование физических процессов;
- физика в ядерной энергетике;
- автоматизация процессов контроля и управления;
- судовые энергетические установки;
- холодильные установки;
- гидравлические энергоустановки;
- компьютерная инженерия и техническая диагностика.

Принимаются статьи на русском и английском языках.

Статья должна быть структурирована и содержать:

- постановку проблемы, ее связь с актуальными научными или практическими заданиями;
- анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы;
- выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которой посвящается данная статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала с полным обоснованием полученных научных результатов;
- выводы по данному исследованию и перспективы дальнейших поисков в данном направлении.

К статье должно прилагаться:

- два экземпляра рукописи статьи, выполненной в соответствии с требованиями, первый экземпляр, подписанный всеми авторами;
- оригинал экспертного заключения о возможности опубликования данной работы в открытой печати;
- рецензия, подписанная доктором наук или кандидатом наук;
- информация об авторах статьи (заголовки статьи, фамилия, имя и отчество (полностью), должность, ученая степень, полный почтовый адрес, контактные телефоны и адреса электронной почты);
- компакт-диск с текстовым файлом.

ОФОРМЛЕНИЕ СТАТЬИ

При подготовке статьи в журнал авторы должны руководствоваться стандартом «Оригиналы авторские и текстовые издательские» (ОСТ 29.115—88). К авторским оригиналам, передаваемым для издания, предъявляются следующие требования.

Статья должна содержать:

- шифр УДК; название статьи; инициалы и фамилии авторов;
- место работы каждого автора с полным почтовым адресом;
- аннотацию на русском языке (4-5 строк), отображающую цель проведенных исследований и основные результаты;
- ключевые слова;
- индекс UDC (УДК для англ. блока);
- заглавие (на английском языке);
- фамилии и инициалы авторов (на английском языке);

- место работы каждого автора с полным почтовым адресом (на английском);
- аннотация на английском языке с заголовком «Abstract»;
- ключевые слова (на английском языке, соответствующие русскоязычному набору);
- статья на языке оригинала;
- список литературных источников на русском языке (6-20 ссылок);
- список литературных источников на латинице: тот же список, что и в статье, но с транслитерацией фамилий и слов, записанных по-русски, и с переводом на английский язык неанглоязычных названий источников).

ОПИСАНИЕ МАКЕТА СТАТЬИ

Статья должна представляться также в электронном виде файлом, подготовленном в текстовом процессоре MS Word в режиме разметки страницы. Файл следует сохранять с расширением *.doc(или *.rtf) без макросов.

Имя файла должно начинаться фамилией контактирующего автора на латинице. Основной текст набирается шрифтом «Times New Roman» (11 пт) через интервал с автоматической расстановкой переносов в две колонки с расстоянием между ними 10 мм.

Ширины верхнего поля – 27 мм, нижнего – 23 мм, левого и правого – 18 мм, первый ряд — отступ 0,75 см.

Название статьи – шрифт 16 пт, ФИО – шрифт 14 пт. Сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, список литературы – шрифт 10 пт.

Рисунки выполняются в графических редакторах и (или) процессорах (Paint, PhotoShop, CorelDraw и т.п.) в с разрешением 300dpi.

Шаблон статьи и требования по ее оформлению приведены на сайте СевГУ: <https://www.sevsu.ru/>.

Статьи, не удовлетворяющие шаблону и требованиям к оформлению, рассматриваться не будут.

Более детальную информацию можно получить в редакции журнала:

ИЯЭиП, ул. Курчатова, 7. Севастополь, 299015, Российская Федерация. E-mail nauchnyyzhurnal@mail.ru, телефон. +7(8692) 71-01-64.

ISSN 2413-5526

**НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
«ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ТЕХНОЛОГИИ»
Том 3 № 2**

**SCIENTIFIC MAGAZINE
«POWER PLANTS AND TECHNOLOGIES»
Vol. 3 No 2**

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, А.А. Чуклин*

Подписано к печати 19.06.2017. Изд. № 67/17. Зак. 32/17. Тираж 65 экз.
Объем 10,5 п.л. Усл. печ. л. 9,76. Уч.-изд. л. 10,29. Формат бумаги 60 x 84 1/8

РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»